

Санкт-Петербургский государственный университет

ОВЧИННИКОВА Анастасия Ильинична

Выпускная квалификационная работа

***Геолого-геоморфологические факторы аварийности
трубопроводов (на примере северных штатов США)***

Направление 05.03.02 «География»

Основная образовательная программа СВ.5019.2015 «География»

Профиль «Геоморфология и палеогеография»

Научный руководитель:
профессор кафедры геоморфологии,
Институт Наук о Земле СПбГУ,
д.п.г., к.г.н., Жиров А.И.

Рецензент:
доцент кафедры естествознания и географии,
ЛГУ им. А.С.Пушкина,
к.г.-м.н. Трифонов А.Н.

Санкт-Петербург

2019

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Физико-географическое описание территории Монтаны, Северной Дакоты и Аляски	6
Глава 2. Четвертичные отложения Монтаны, Северной Дакоты и Аляски.....	13
Глава 3. Системно-морфологический подход А.Н.Ласточкина: геотопологические параметры и их геоэкологическое значение	24
Глава 4. Создание базы данных аварий трубопроводов в трёх штатах США и измерение геотопологических параметров элементарных поверхностей на репрезентативном трубопроводе.....	28
Глава 5. Распределение природообусловленных аварий трубопроводов по геолого-геоморфологическим параметрам элементарных поверхностей	34
5.1. Анализ распределения природообусловленных аварий по геоморфологическим характеристикам элементарных поверхностей	34
5.2. Анализ распределения природообусловленных аварий по различным типам четвертичных отложений	42
Глава 6. Сравнение полученных данных о распределении аварий в северных штатах США с литературными данными о распределении аварий в Российской Федерации.....	46
Заключение.....	50
Список использованной литературы.....	53
Приложение.....	56

Введение

Одной из задач инженерно-геологических изысканий является изучение причин и условий аварийности существующих трубопроводов для целей информационного обеспечения проектирования трубопроводов и объектов инженерного обустройства, а также рациональной эксплуатации трубопроводной системы. В частности, оценка факторов аварийности трубопроводов необходима для выбора оптимальной трассы трубопроводов; разработки инженерных решений по предотвращению аварийных ситуаций; оценки возможного воздействия на окружающую среду и разработки природоохранных мероприятий.

Инженерно-геологические изыскания включают в себя предполевой, полевой и заключительный этапы (Симонов, Кружалин, 1993). В рамках предполевого этапа проводят сбор литературных данных, которые используются на втором и третьем этапах, а, главное, при обосновании выводов и рекомендаций. Таким образом, при прогнозировании потенциальной аварийности современные инженерно-геологические изыскания для строительства трубопроводов основываются на предшествующих полевых исследованиях и оценке состояния уже эксплуатируемых трубопроводов. Это есть пример решения обратной задачи исследований – прогнозирования еще не исследованных свойств (потенциальной аварийности) на основе выявленных ранее корреляций между геолого-географическими свойствами местности и параметрами аварийности. Например, оценка риска аварийности на проектируемых трубопроводах Южно-Баганского месторождения в республике Коми (Жиров и др., 2016) была основана на эмпирических данных по аварийности трубопроводов, полученных для разных типов элементарных поверхностей (Арманд, 1993) и для участков земной поверхности с разными геоморфологическими параметрами (Машков К.А. 2007) .

Среди факторов аварийности трубопроводов выделяют природные и антропогенные. К антропогенным факторам аварийности относят конструктивные недостатки трубопровода, брак строительства/изготовления, ошибочные действия персонала при эксплуатации, износ оборудования и др. (Савонин и др., 2015). Природные факторы, доля которых составляет примерно 30 %, включают в себя "коррозионные воздействия и воздействия геологической среды, проявляющиеся как экзогенные геологические процессы" (Машков, 2007).

Существует проблема отсутствия единой методики оценки природных факторов аварийности. Исследования российских учёных (Жиров и др., 2016; Машков, 2007;

Марахтанов, Великоцкий, 2015) плохо сравнимы между собой, так как подходы, использованные в разных регионах, привязаны к местным условиям (например, при выделении того или иного типа рельефа, ландшафта, фитоценоза). Из-за этого трудно выделить формализованные и чётко определяемые природные факторы, которые можно было бы использовать в среде ГИС. Для формализации лучше использовать системно-морфологический подход А.Н.Ласточкина, опирающийся на интегративную роль рельефа в природных ландшафтах и основанный на первоначальном выделении и фиксации морфологических элементов земной поверхности. С А.Н.Ласточкиным соглашается и А. В. McBratney с соавторами (McBratney и др., 2000.), отмечая, что среди переменных окружающей среды наиболее диагностически ценными оказываются характеристики рельефа. А.Н.Ласточкин выделяет такие основные геоморфологические параметры, как абсолютная высота, уклон (крутизна) земной поверхности, вертикальная кривизна, горизонтальная кривизна (Ласточкин, 2011). Исследователи (Жиров и др., 2016; Машков, 2007; Марахтанов, Великоцкий, 2015) изучали зависимость аварийности от природных факторов, а именно распределение аварий по стратиграфо-генетическим комплексам и отдельным геоморфологическим параметрам (по склонам различной крутизны, по склонам различной экспозиции, распределение в зависимости от растительности, типа рельефа, от угла между трубопроводом и линией (азимутом) падения склона), однако в анализ не были включены такие геоморфологические характеристики, как абсолютная высота, горизонтальная и вертикальная кривизна, а, главное, приуроченность к тому или иному площадному элементу рельефа или близость к его линейным элементам – структурным линиям.

Поэтому *целью данной работы* является выявление закономерностей распределения природообусловленных аварий трубопроводов по разным типам элементарных поверхностей с разными геоморфологическими и геологическими характеристиками. Среди *анализируемых параметров*: абсолютная высота, крутизна склона (уклон), горизонтальная кривизна, вертикальная кривизна, относительная высота, элементарные поверхности, азимут падения склона, близость к структурной линии, четвертичные отложения.

Для достижения цели необходим анализ детальной статистики аварийности на трубопроводах. К сожалению, российская статистика аварийности на трубопроводах отсутствует в открытом доступе, есть только некоторые обобщающие данные по трубопроводной системе РФ (Власова, 2017). Однако, необходимая статистика была обнаружена в Национальной системе картографирования трубопроводов США. В этой базе наряду с интерактивной картой с объектами трубопроводной инфраструктуры

содержатся подробные протоколы аварий. Для анализа были выбраны три штата – Аляска, Монтана, Северная Дакота – чьи природные условия ближе к российским.

Объектом исследования являются трубопроводы на территории 3-х штатов США (Монтана, Северная Дакота, Аляска). **Предмет** - геолого-геоморфологические факторы, влияющие на аварийность трубопроводов.

Задачи исследования:

- Сбор статистических данных об авариях в трёх штатах США (Монтана, Северная Дакота, Аляска) и создание базы данных с измеренными геолого-геоморфологическими параметрами
- Измерение геоморфологических параметров элементарных поверхностей на репрезентативном трубопроводе и их сравнение с распределением точек аварий по геоморфологическим параметрам
- Статистическая обработка данных и их анализ
- Сравнение полученных результатов с литературными данными о распределении аварий на трубопроводах РФ

Используемые материалы:

- база данных об авариях трубопроводов на территории США Национальной системы картографирования трубопроводов США (The National Pipeline Mapping System – NPMS), выложенная в Интернет;
- навигационная программа SAS.Planet, позволяющая работать с большим количеством картографических online-сервисов;
- топографические карты ESRI (USA_Topo_Maps) – бесшовные отсканированные изображения бумажных топографических карт Геологической службы США (USGS) масштабов 1:100 000 и 1:24 000 (для Аляски - 1:250 000 и 1:63 000);
- космические снимки картографического сервиса Bing Maps;
- база данных Геологической службы США (U.S. Geological Survey) и Ассоциации американских государственных геологов (Association of American State Geologists (AASG)) "Национальная геологическая карта США" (National Geologic Map Database (NGMDB)), дающая доступ к картам и публикациям Геологической службы США, правительственных агенств, обществ, университетов и частного сектора;
- программа Excel для создания базы данных и статистической обработки результатов.

Глава 1. Физико-географическое описание территории Монтаны, Северной Дакоты и Аляски

Монтана

1. *Географическое положение.* Штат Монтана находится на северо-западе США, является четвёртым по площади из 50-ти штатов США. На севере граничит с Канадой, на юге со штатом Вайоминг, на западе со штатом Айдахо, на востоке - со штатами Северная Дакота и Южная Дакота.

2. *Физико-географические области.* Территория штата Монтана относится к Северо-Американской платформе, фундамент которой обнажается в восточной части Скалистых гор(архейские горные породы). Территорию Монтаны можно разделить на две области – Великие равнины и регион Скалистых гор (URL: [http:// www.mapsofworld.com](http://www.mapsofworld.com)).

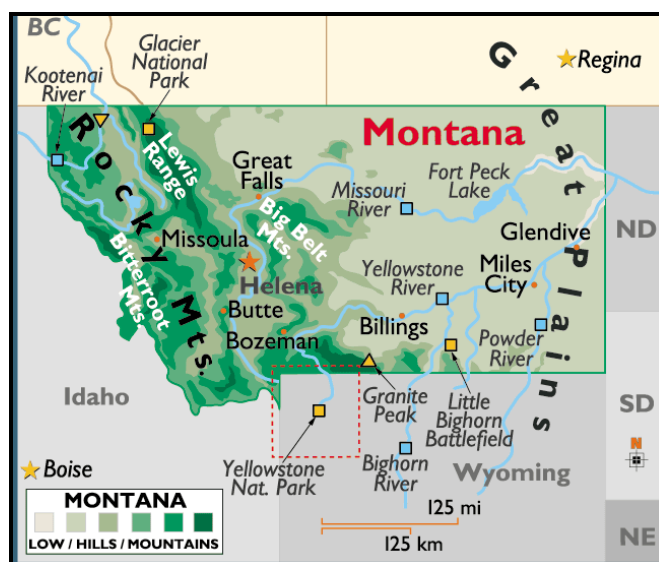


Рис.1. Картограмма физико-географических областей Монтаны (Российский онлайн-ресурс карт и картографических материалов. URL: <http://www.planetolog.ru>)

- Великие равнины: находятся на востоке штата, покрывают приблизительно 3/5 площади штата. Великие равнины являются частью внутренней равнины Северной Америки, которая простирается от Канады на юг до Мексики. Район характеризуется высотами 700—1800 м над уровнем моря, на ровной поверхности встречаются холмы и широкие речные долины. Здесь проходят горные цепи Берс По Маунтинс (Bears Paw Mountains, достигают 2108 метров над уровнем моря), Биг Сноуи Маунтинс (Big Snowy Mountains, 2646 метров), Джудит Маунтинс (Judith Mountains, 1959 метров), Little Rocky Mountains (1747 метров) (URL: [http:// www.mapsofworld.com](http://www.mapsofworld.com)).
- Регион Скалистых гор: находится на западе штата, занимает 2/5 площади штата Монтана. Регион состоит из плоских долин и гор. Юго-западные долины имеют

ширину от 45 до 65 км, а долины на севере более узкие; шириной от 1,5 до 8 км. Многие горы покрыты снегом в течение примерно 8-10 месяцев в году, на больших высотах существуют горные ледники. В регионе насчитывается более пятидесяти горных хребтов, например, хребет Абсарока (Absaroka, 4009 метров), Beartooth Mountain (3766 метров), Beaverhead Mountains (3473 метров), Mission Mountains (2990 метров), Сун Рейндж (Swan Range, 2852 метра) и Тобакко Рут Маунтинс (Тобассо Рут Маунтинс, 3232 метра). Наивысшая точка Монтаны – Гранит-Пик (хребет Беартут) – имеет высоту 3904 метра над уровнем моря (URL: <http://www.mapsofworld.com>).

3. *Климат.* Из-за обширной территории и разнообразного рельефа климатические условия Монтаны довольно разнообразны. Средние дневные температуры меняются от -2°C в январе до $29,2^{\circ}\text{C}$ в июле. Средний по штату уровень осадков составляет около 380 мм, однако сильны различия между разными районами. Горные хребты на западе штата создают дождевую тень для восточных равнин. В городке Херон (запад округа Сандерс) на крайнем западе Монтаны в год выпадает 881 мм осадков, однако в городке Лонпайн (восток округа Сандерс) на восточной стороне хребта уровень осадков уже всего 291 мм. В некоторых горных районах годовой уровень осадков может достигать 2500—2700 мм (URL: <http://www.mapsofworld.com>).

4. *Реки и озёра.* На территории Монтаны протекает более 20 крупных рек. Питание смешанные, главным образом дождевое и снеговое, однако встречается и подземное (например, у реки Тонг). Почти все реки Монтаны являются притоками реки Миссури или притоками притоков. Наиболее крупные реки штата – Миссури (длина 3767 км), Милк (1173 км, левый приток Миссури), Йеллоустон (1114 км, правый приток Миссури). Система реки Кларк-Форк (499 км), впадающей в озеро Панд-Орей, менее крупная. Её притоками являются реки Биттеррут (75 км) и река Флатхед (254 км), имеющая три верховья - Мидл-Форк-Флатхед (148 км), Норт-Форк-Флатхед (246 км) и Сайт-Форк-Флатхед (158 км). Река Кутеней (780 км) впадает в реку Колумбия, которая по территории штата не протекает.

Крупнейшие озёра штата Монтана это Уотертон (озёрная группы из трёх водоёмов), Флатхед и Эшли. Флатхед и Эшли - это озёра, оставшиеся после более древнего и более крупного озера Миссула, существовавшего в конце последнего ледникового периода. Также стоит упомянуть о молодых озёрах Беркли-Пит (находится в большой яме старого медного рудника около города Бьютт) и Куэйк (образовалось в результате землетрясения 1959 года) (URL: <http://www.mapsofworld.com>).

Северная Дакота

1. *Географическое положение.* Штат Северная Дакота находится на северо-западе США, на севере граничит с Канадой, на юге со штатом Южная Дакота, на западе со штатом Монтана, на востоке - со штатом Миннесота.

2. *Физико-географические области.* С востока на запад Северная Дакота разделена на три географических региона. На востоке находится долина реки Ред-Ривер. К западу от долины Ред-Ривер находится Дрифт-прерия. Юго-западная половина Северной Дакоты покрыта Великими равнинами (Электронная энциклопедия по географии США. URL: <http://www.netstate.com>).



Рис.2. Картограмма физико-географических областей Северной Дакоты (Российский онлайн-ресурс карт и картографических материалов. URL: <http://www.planetolog.ru>)

- Долина реки Ред-Ривер плоская, абсолютные высоты от 250 до 300 метров. Она расположен вдоль границы Миннесоты и является одним из самых плодородных районов в мире. Эта область Северной Дакоты – фермерская страна, здесь выращивают пшеницу и другие культуры и разводят домашний скот.
- К западу от долины Ред-Ривер находится область Дрифт-Прейри, поднимающийся с 60 до 610 метров над долиной Ред-Ривер. Высота рельефа здесь постепенно поднимается от 600 до 1200 метров на уровне моря, а земли также активно используются в сельском хозяйстве. Дрифт-Прейри отделена от долины Ред-Ривер на севере холмами Пембина. Эта область отмечена холмами, долинами рек и

многочисленными озерами. На севере расположено плато Тертл-Маунтин (Turtle Mountains), которое имеет высоту 600 метров над уровнем моря, простирается на 32 км с севера на юг и 64 км с востока на запад.

- Около половины Северной Дакоты покрыто Великими равнинами. Великие равнины, расположенные в юго-западной части штата, поднимаются примерно на 90-120 метров над Дрифт-Прейри к востоку от реки Миссури. Область холмистая и богата минеральными ресурсами. Вдоль реки Миссури поверхность ниже, эта область называется Разрыв Миссури. К югу и западу от реки находится область волнистых долин и останцов, называемых Слоуп (the Slope).
- На юго-западе Северной Дакоты расположены Бедлэнды, которые простираются полосой примерно на 300 км и имеют ширину около 10-30 км. Бедлэнды представляют собой обширные холмистые и изрезанные оврагами территории с глинистыми почвами и многочисленными скальными выходами, где под действием физического выветривания образуются необычные формы рельефа: пирамиды, купола и конусы, окрашенные в оттенки коричневого, красного, серого и желтого цветов. В некоторых районах Бедлэндов породы содержат лигнитовый уголь (бурый уголь, содержащий обильные включения плохо разложившихся древесных остатков), который подвержен самовозгоранию. Поэтому глина над этими угольными пластами стала ярко-розовой и красной. Уайт Бьютт – самая высокая точка в Северной Дакоте – имеет высоту 1069 метров над уровнем моря и расположена на территории Бедлэндов (Электронная энциклопедия по географии США. URL: <http://www.netstate.com>).

3. *Климат.* Климат Северной Дакоты — континентальный, характеризуется жарким летом и холодными зимами. Абсолютный максимум — 49 °С, абсолютный минимум –51,1 °С. Средняя температура января: от –8 до –16 °С, июля: 18—24 °С. Среднегодовое количество осадков варьирует от 220 до 560 мм. Весной в долине Ред-Ривер часто происходят наводнения (Электронная энциклопедия по географии США. URL: <http://www.netstate.com>).

4. *Реки и озёра.* На территории Северной Дакоты протекает 7 крупных рек. Питание смешанные, главным образом дождевое и снеговое, однако встречается и подземное (например, у реки Джеймс). Наиболее крупные реки штата – Миссури (длина 3767 км), Джеймс (1143 км), Йеллоустон (1114 км, правый приток Миссури), Малая Миссури (901 км, приток Миссури), Ред-Ривер (877 км, впадает в оз. Виннипег, Канада), Сурис (720 км, приток р. Ассинибойн, Канада), Найф (193 км, приток Миссури).

Район Дрифт-Прейри представляет собой холмистую равнину с многочисленными озёрами, образованными дрейфующим ледником. Самые крупные водоёмы штата — озеро

Сакакавиа (водохранилище на реке Миссури, площадь 1240 км²) и Девилс-лейк (самый крупный природный водоём в штате).

Аляска

1. *Географическое положение.* Аляска - крупнейший штат США, на востоке граничит с Канадой, с севера и запада омывается Северным Ледовитым и Тихим океаном соответственно.

2. *Физико-географические области и вулканизм.* В Аляске можно выделить 4 физико-географических области: Тихоокеанскую горную систему, центральные возвышенности и низменности, продолжение системы Скалистых гор на Аляске и Арктическую прибрежную зону (Зарубежный (США и Индия) онлайн-ресурс карт и картографических материалов. URL:<http://www.mapsofworld.com/>)



Рис.3. Картосхема физико-географических областей Аляски (Российский онлайн-ресурс карт и картографических материалов. URL: <http://www.planetolog.ru>)

- Тихоокеанская горная система: система тихоокеанских гор разделена на множество хребтов и проходит от Алеутских островов до южной центральной Аляски. Он включает в себя хребет Сент-Элиас (горы Святого Ильи, высоты до 5956 м), горы Врангеля (высоты до 4996 м), горный массив Чугач (высоты до 3990 м), Горы Талкитна (до 2697 м) и горный хребет Кенай (средние высоты 900-1500 м). В этом регионе расположены два крупных низменных района – бассейн реки Коппер и

лесистая низменность залива Кука. Бассейн реки Коппер расположен между горами Чугач и горами Врангеля.

- Центральные возвышенности и низменности: этот регион расположен между Аляскинским хребтом Тихоокеанской горной системы на юге и хребтом Брукса в Скалистых горных системах на севере. На востоке это плато высотой от 1200 м, на западе до 600 м, где постепенно переходит в низменность. Рельеф характеризуется низкими холмами и болотистыми речными долинами.
- Продолжение системы Скалистых гор на Аляске: этот район включает в себя хребет Брукса (средние абсолютные высоты 2000—2500 м) и его предгорья. Он расположен к северу от Центральных возвышенностей и низменностей.
- Арктическая прибрежная равнина: самый северный регион Аляски известен как Арктическая прибрежная равнина (высоты примерно до 500 м, преимущественно 200-300 и ниже). Для него характерны тундровые ландшафты и периодическое оттаивание замёрших грунтов, что приводит к частичной деградации мерзлоты и образованию термокарстовых озёр (Зарубежный (США и Индия) онлайн-ресурс карт и картографических материалов. URL:<http://www.mapsofworld.com>)

На территории Аляски расположено 130 вулканов и вулканических полей, которые были активны в течение последних двух миллионов лет. Большинство вулканов Аляски сосредоточены вдоль Алеутской островной дуги, которая простирается в западном направлении к Камчатке и образует северную часть Тихоокеанского огненного кольца (Официальный сайт Обсерватории вулканов Аляски (The Alaska Volcano Observatory). URL: <http://www.avo.alaska.edu>). Вулканизм на Аляске и Алеутских островах преимущественно обусловлен субдукцией Тихоокеанской литосферной плиты под Северо-Американскую плиту, однако образование части вулканов, активных в голоцене, связано с внутриплитными процессами.

3. *Климат.* Четыре основные климатические зоны Аляски тесно связаны с геоморфологическими провинциями. С юга на север выделяются следующие климатические зоны: приморская, зона перехода от морского к континентальному климату, континентальная и арктическая зоны (Pewe и другие, 1999). На Тихоокеанском побережье климат умеренный, морской, относительно мягкий. Климат внутренних районов Аляски - континентальный субарктический, на юго-западе - морской субарктический, северного района Аляски - арктический с долгой холодной зимой и прохладным летом. Самые высокие и самые низкие температуры штата были зафиксированы во внутренних районах: самая высокая температура составляла 37,8 °С, самая низкая – -62,2 °С. Количество осадков незначительно как во внутренних районах,

так и в северной части штата. Среднемесячное количество осадков выше всего в сентябре или октябре, а ниже всего в мае-июне. Благодаря дождевой тени прибрежных гор, в Южной и Центральной Аляске не так много дождей, как на Юго-востоке штата, хотя осадков в виде снега в тех же областях выпадает до 7,62 м. Во Внутренней Аляске часто в год выпадает менее 254 мм осадков (Зарубежный (США и Индия) онлайн-ресурс карт и картографических материалов. URL: <http://www.mapsofworld.com>).

4. *Реки и озёра*. На территории Аляски находится: более 3 млн озер и 3 тыс. рек. Крупнейшая река – Юкон – является 3-ей по протяженности в США. Другие крупные реки Аляски – Танана, Коюкук, Колвилл, Сагаванирток, Айвишак, Инноко, Кускоквим, Кенай, Дельта, Нушагак, Ноатак, Уайт-Ривер (приток Юкона), Лета, Коппер, Касилоф, Алсек, Фортимайл, Ненана, Рашен-Ривер. Сток рек осуществляется в бассейны двух океанов — Тихого и Северного Ледовитого.

Озёра Аляски имеют в основном ледниковое или ледниково-тектоническое происхождение. Крупнейшие озёра - это Илимна (2622 км²), оз. Бочарова (1173 км²), Селавик (1046 км²), Накнек (610 км²), Кларк (435 км²), Тешекпук (430 км²) и другие (Электронная энциклопедия по географии США. URL: <http://www.netstate.com>).

Монтана и Северная Дакота

Ледниковые области

Во время максимального развития плейстоценового оледенения свыше половины площади Северной Америки было покрыто льдом. Граница оледенения проходит вблизи рек Миссисипи и Миссури до города Канзас-Сити, далее через восточную часть штата Канзас, восточную часть штата Небраска, центральную часть Южной Дакоты, юго-западную часть Северной Дакоты до Монтаны немного южнее р.Миссури. Отсюда южная граница покровного оледенения поворачивает на запад до подножья Скалистых гор в северной Монтане (рис. 4).

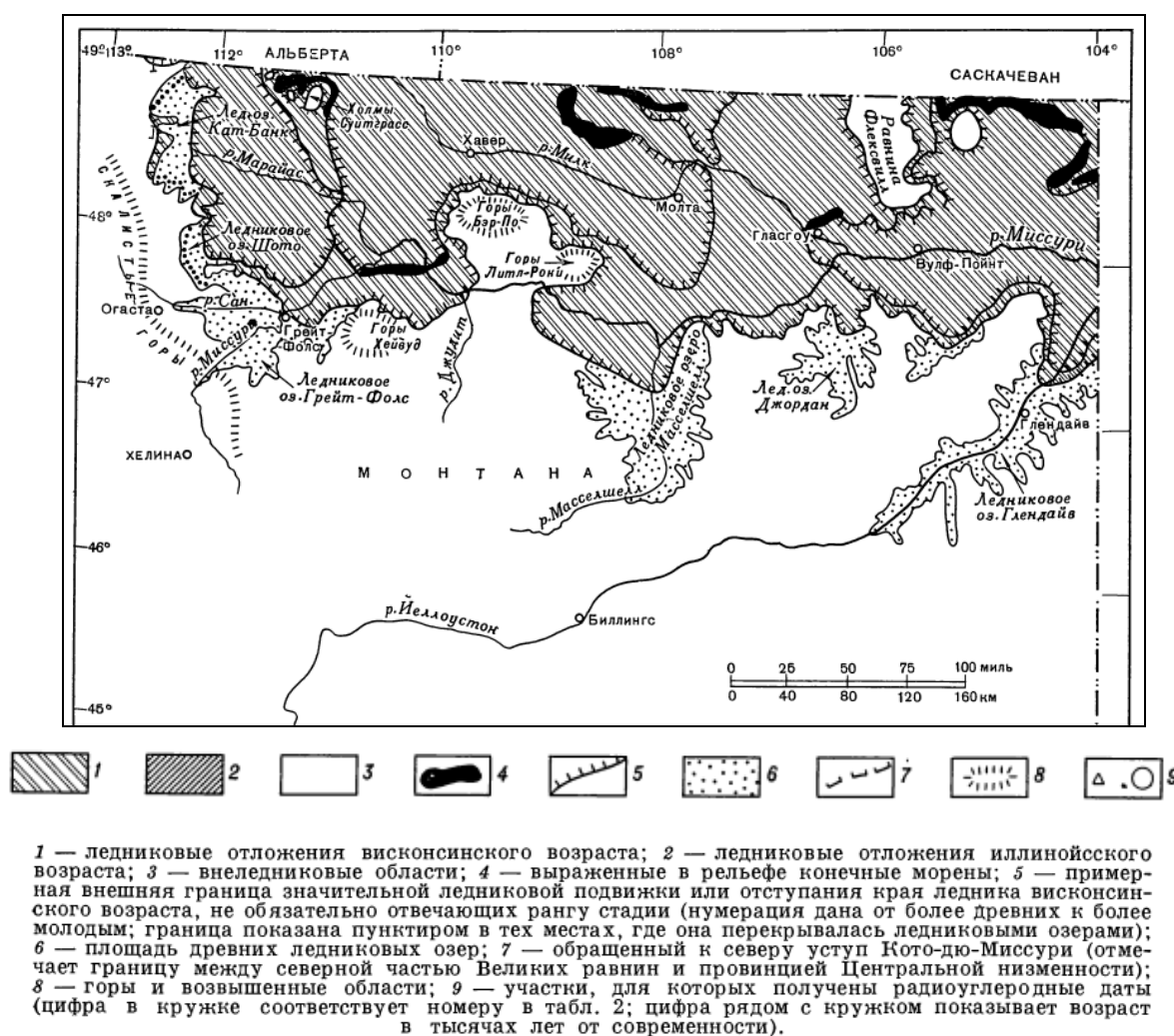


Рис.4. Фрагмент карты ледниковых и внеледниковых областей штата Монтана

(Lemke и др., 1965)

Значительная часть территории Северной Дакоты и Монтаны находится в пределах севера Великих равнин. В местах, где территория покрыта ледниковых отложениями, поверхность слабо волнистая и постепенно погружается на восток. Монотонность

равнинного рельефа нарушается речными долинами, останцами и моренными холмами и грядами. Из северо-восточной Монтаны в южную половину центральной части Южной Дакоты протягивается возвышенная гряда Кото-дю-Миссури (самая восточная часть провинции Великих равнин), сложенная моренными материалом, образовавшимся при таянии мертвого льда (dead-ice moraine на рис.5). На северо-востоке гряда обрывается уступом, высота которого в Северной Дакоте достигает 60-90 метров. Этот уступ определял направление ледников и определял положение конечных морен, так как играл роль упора для наступающих ледников; также по уступу проводится граница между провинцией Великих равнин на западе и провинцией Центральной низменности на востоке. Ледниковые отложения на Кото-дю-Миссури относятся к сложной системе конечноморенных гряд (Townsend, Jenke, 1951).

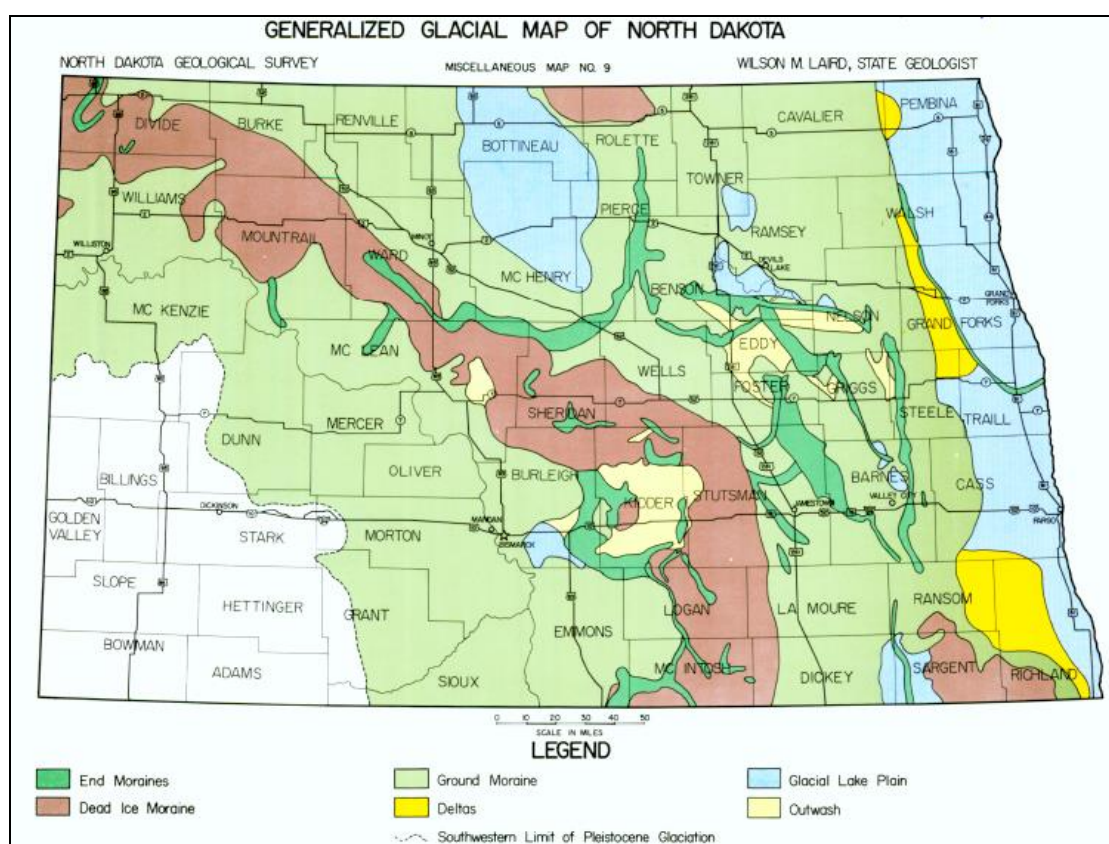


Рис.5. Генерализованная карта ледниковых отложений Северной Дакоты (Generalized Glacial Map of North Dakota, by Wilson M. Laird, 1965 (Repr. 1967))

Многие останцовые горы и другие возвышенности (горы Хейвуд, Бэр-По, Литл-Роки и равнина Флексвилл) даже в той части штата Монтана, которая подвергалась оледенению, лишены покровов ледниковых отложений (рис. 4).

Отложения приледниковых озёр в северной части Великих равнин определяются режимом оледенения. Например, ледниковые озёра Кат-Банк, Шото, Грейт-Фолс, расположенные на территории Монтаны (рис. 4), были подпружены ледниками двух

самостоятельных подвижек, что сказалось на строении осадков – переслаивание алевритов и глин мощностью более 22 метра. На некоторых участках территории, занятой ранее ледниковым озером Грейт-Фолс, озёрные отложения местами перекрывают, а местами покрывают мощную морену. Они (озёрные отложения) состоят из двух толщ: верхняя толща преимущественно состоит из мелкого песка и ила, нижняя толща - в основном ил с небольшим количеством глины и мелкого песка (Wayne и др., 1991). Ледниковые равнины в этом районе обычно покрыты глиной, гравием, песком и илом, оставленными прогляциальным озером Грейт-Фолс, или моренами; иногда они покрыты гравием и представляют собой бывшие озерные бассейны, оставленными оледенением Висконсина 85 000–11 000 лет назад (Официальный сайт Службы охраны природных ресурсов США. URL: <http://www.nrcs.usda.gov>).

Для ледниковых озёр Масселшелл, Джордан и Глендаив характерно почти полное отсутствие озёрных отложений, что объясняется кратковременностью существования этих озёр. Само существование озёр определяется по распространению эратических валунов, высотному положению ложбин стока и другим особенностям рельефа.

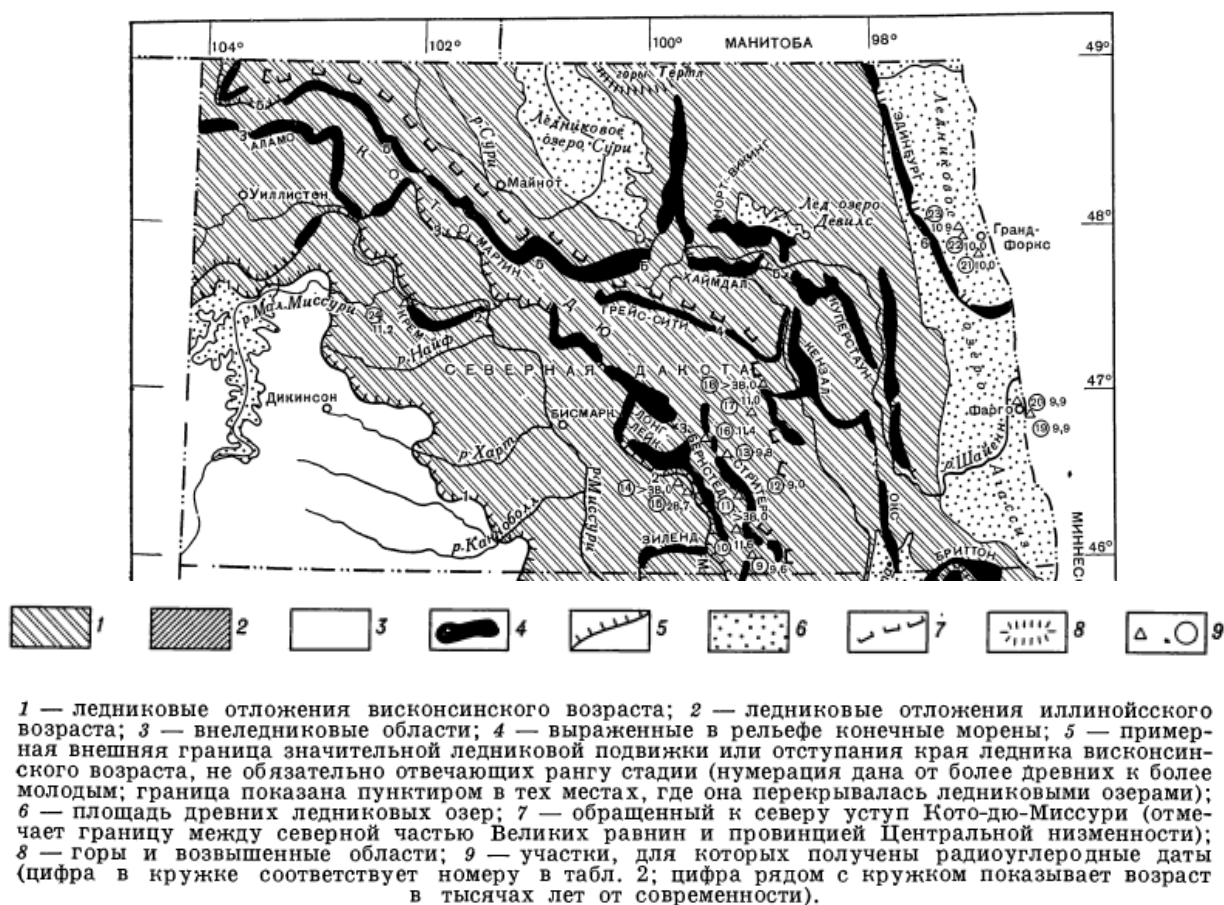


Рис.6. Фрагмент карты ледниковых и внеледниковых областей штата Северная Дакота (Lemke и др., 1965)

Поверхность Центральной низменности в Северной Дакоте имеет слабый уклон на восток, к днищу ледникового озера Агассиз, и покрыта большей частью мощными образованиями донной морены, флювиогляциальными отложениями, хорошо выраженными конечными моренами и озёрно-ледниковыми отложениями (рис.5; рис.6). Над окружающей местностью возвышаются столовые горы Тёртл, которые перекрыты моренным материалом, образовавшимся при таянии мёртвого льда (рис.6).

Три ледниковых озера – Сури, Девилс и крупнейшее Агассиз – занимали часть территории Центральной низменности в Северной Дакоте (рис.6). Озёрные отложения озёра Агассиз состоят из алевроитов и песка, местами подстилаемых глинами, и имеют мощность от нескольких метров до 20 метров и более. Озёрные отложения озера Сури имеют мощность от 0 до 22 метров и состоят преимущественно из песка с небольшой примесью мелкого гравия, алевроитов и глин. Отложения ледникового озера Девилс маломощные, местами присутствуют только в виде отдельных пятен; в результате волноприбойной деятельности из морены вымывались отдельные валуны и глыбы, которые теперь разбросаны по бывшему дну озера (Агонow и др., 1953)

Довисконсинские оледенения не были точно установлены ни на территории Монтаны, ни на территории Северной Дакоты. Лишь к юго-востоку от Бисмарка (Северная Дакота) Клейтоном (Clayton, 1962) была описана морена, которая может быть древнее, чем висконсинская. Эта морена сильно уплотнена и перекрыта 30-сантиметровым слоем ожелезнённого галечника и примерно 6-метровой толщиной более молодой морены; также она рассечена трещинами глубиной до 3 метров. В Монтане морены, более древние, чем висконсинские, отмечались на северо-востоке штата вдоль речки Смок-Крик, однако существуют сомнения в ледниковом происхождении этих отложений (Howard, 1960).

Висконсинские оледенения

На территории Монтаны и Северной Дакоты установлено шесть отчётливых и самостоятельными ледниковых подвижек висконсинского возраста, морены которых сходны по литологическому составу: в них содержится одинаковое количество глины, алевроита и песка, гравийный материал составляет менее 5%, а крупные валуны - менее 1%. Неожелезнённые морены имеют окраску от тёмно- и зеленовато-серой до голубовато-серой. При окислении окраска становится бурой до коричневатой-жёлтой. Нередко отмечается частичная цементация известковыми соединениями до глубины 0,5 - 1,5 метра (Lemke, 1960).

Последнедниково́е

Ледниковый рельеф Монтаны и Северной Дакоты хорошо сохранился и мало изменён деятельностью современных рек. В Северной Дакоте на дне некоторых ледниковых озёр образовались дюны и флювиогляциальные равнины (рис.7). В некоторых районах центральной Монтаны сохранились изолированные останцы, сложенные пеплами двух циклов вулканической деятельности вулкана Мазама, который расположен в штате Орегон (Powers, Wilcox, 1964). В районе Грейт-Фолс представлена хорошо развитая ископаемая почва, которая залегает на активно размываемом аллювии и подстиляет пеплы вулкана Мазам (Lemke и др., 1965).

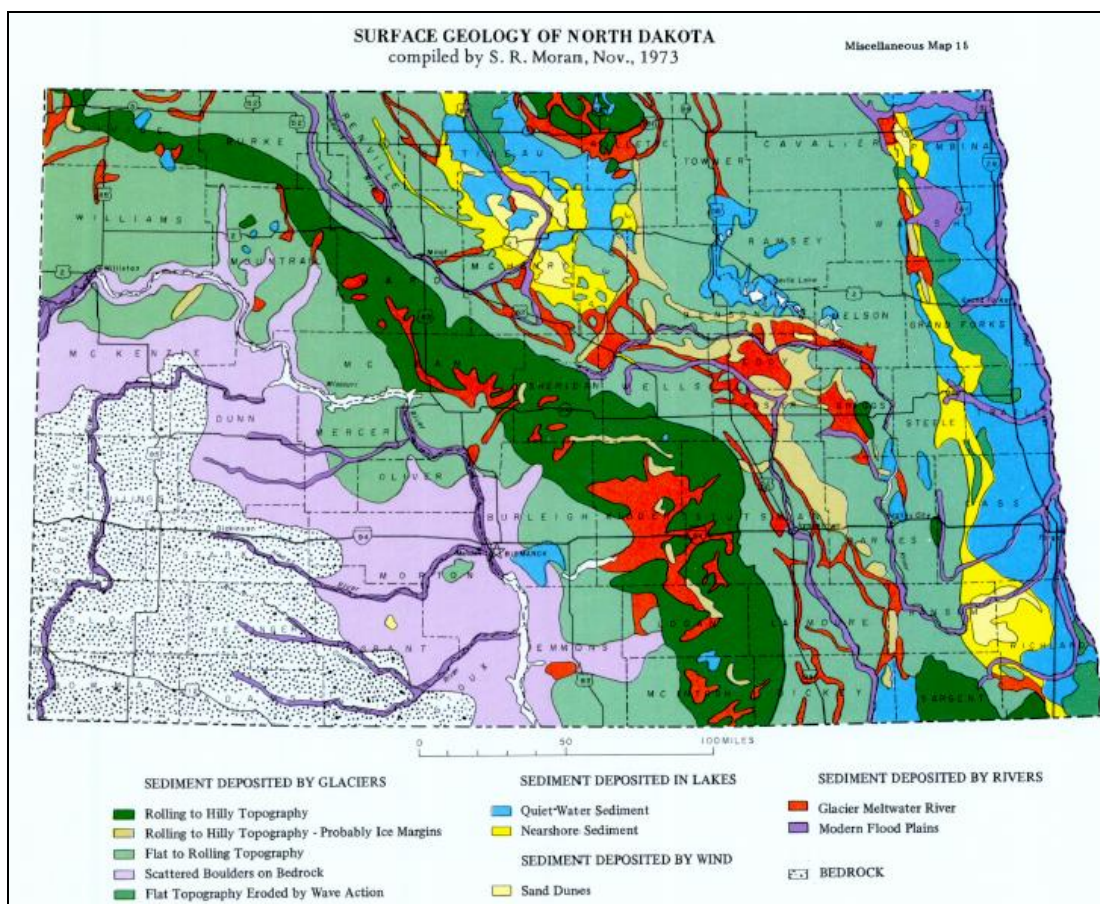


Рис.7. Карта поверхностных отложений Северной Дакоты (Surface Geology of North Dakota, by S. R. Moran, 1973).

Внеледниковые области

Четвертичные отложения внеледниковой области Великих равнин представлены в основном речными отложениями, которые переносились на восток от Скалистых гор; также местами встречаются эоловые пески и лёссы, а также озерные отложения, осажженные в ледниково-подпрудных озерах (Wayne и др., 1991).

Многие горные останцы и высокие равнины не были покрыты материковым ледником. К числу таких равнин относится равнина Флексивилл (Монтана), которая сложена миоценовыми и плиоценовыми аллювиальными отложениями – галечниками, подстилаемыми палеогеновыми отложениями (рис.4). Области, находившиеся за пределами границ оледенения, включают юго-западную часть Северной Дакоты (рис.6) и южную половину Монтаны (рис.4).

Внеледниковая возвышенная область Северной Дакоты слабо наклонена к востоку (от 850 до 760 метров). Слабоволнистая поверхность соответствует зрелому рельефу, речная сеть хорошо развита. Над этой областью возвышаются отдельные останцы высотой до 1015 метров. Во многих районах, прилегающих к рекам Миссури и Малая Миссури, образовались обширные бедленды. Возвышенная область пересечена большим числом широких долин юго-восточного направления, которые ранее являлись ложбинами стока талых воды и использовались реками Миссури, Йеллоустон, Малая Миссури и другими (рис.7).

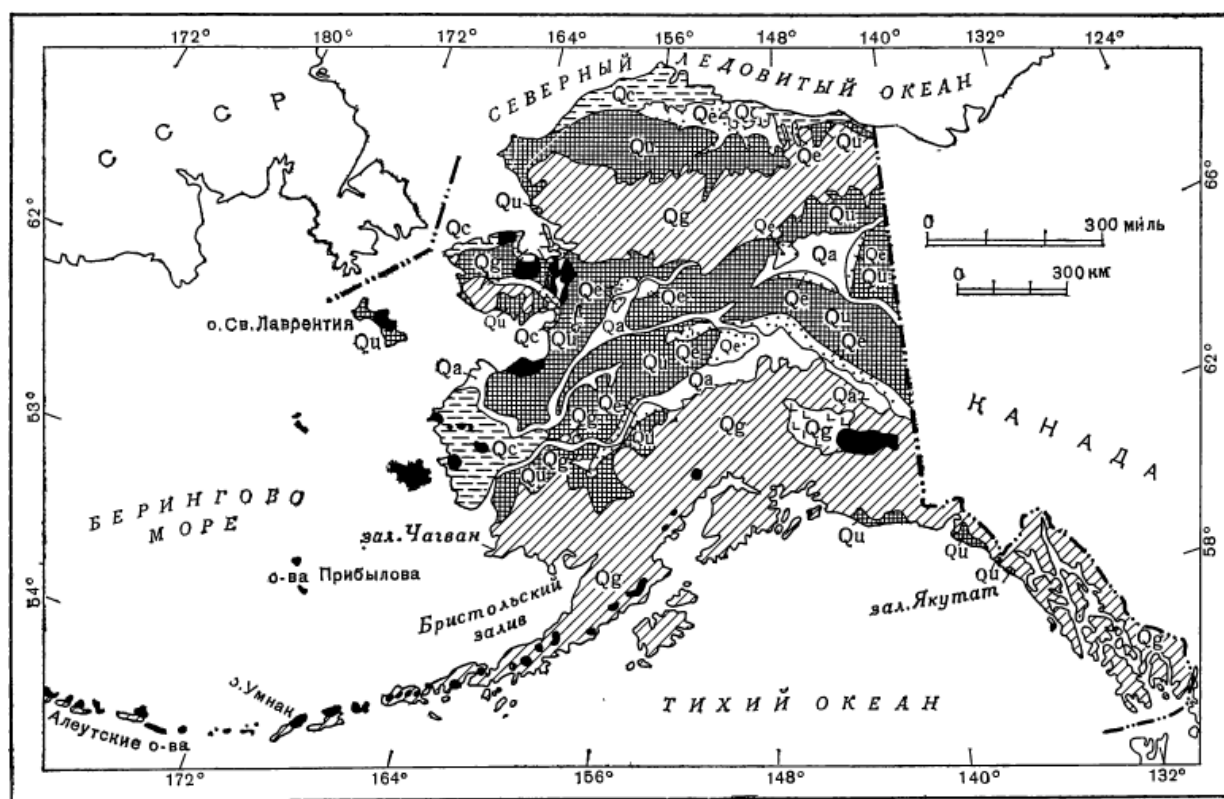
Внеледниковая область в восточной части Монтаны сходна с внеледниковой областью Северной Дакоты. Река Йеллоустон и её притоки образовали широкие ложбины шириной 1,5-6,5 км, которые использовались водотоками, вытекавшими из приледниковых озёр. В южной части Монтаны террасы долины реки Йеллоустон сложены аллювиальными галечниковыми отложениями различного возраста (Howard, 1960). Наиболее древние галечники рассматриваются как стратиграфические эквиваленты миоценовых или плиоценовых галечников флексвилл в северо-восточной Монтане, которые представляют собой плохо сортированные валунные, галечно-гравийные и гравийно-песчаные отложения (Wayne и др., 1991). Более молодые галечники встречаются на более низких террасах реки Йеллоустон; например, на плёсах нижнего течения реки Йеллоустон они носят названия галечников картрайт, относимые к плейстоцену. Ещё более молодые развиты на участке нижних плёсов реки Йеллоустон и названы галечниками крейн-крик, поверхность их превышает современную пойму реки Йеллоустон на 7 метров. Эти галечники не содержат обломочного материала ледникового происхождения (Howard, 1960). Террасы в водосборных бассейнах Йеллоустона и Масселшелл, по мнению Риттера (Ritter, 1967) сложены гравием, который был отложен во время таяния горных ледников в плейстоцене.

Останцовые горы на территории штата Монтана включают горы Хейвуд, Бэр-По, Литл-Роки (рис.4), а также Джудит, Северные и Южные Мокасин и Биг-Сноуи, расположенные южнее, во внеледниковой области в пределах Великих равнин. Эти останцовые горы окаймляют три хорошо выраженных педимента различного возраста,

которые местами сливаются с аллювиальными конусами выноса и террасами на прилегающих равнинах (Alden, 1932).

Аляска

Четвертичные отложения покрывают почти всю территорию Аляски (рис.8). Около половины территории покрыто ледниковыми отложениям. Вторую половину составляют вулканические, морские, речные, озёрные ледниковые и эоловые отложения, которые часто формируются в перигляциальных условиях. Ледниковые и неледниковые морские отложения формируются вдоль обширного побережья, а вулканические отложения распространены на юго-западе Аляски. С ледниковых долин и задровых равнин происходит перевевание пыли, которая осаждается в виде лёссовых отложений на близлежащих территориях. В холодных районах штата в перигляциальных условиях развиваются такие геологические процессы, как солифлюкция, морозное выветривание и формирование многолетней мерзлоты (Pewe и др., 1999).

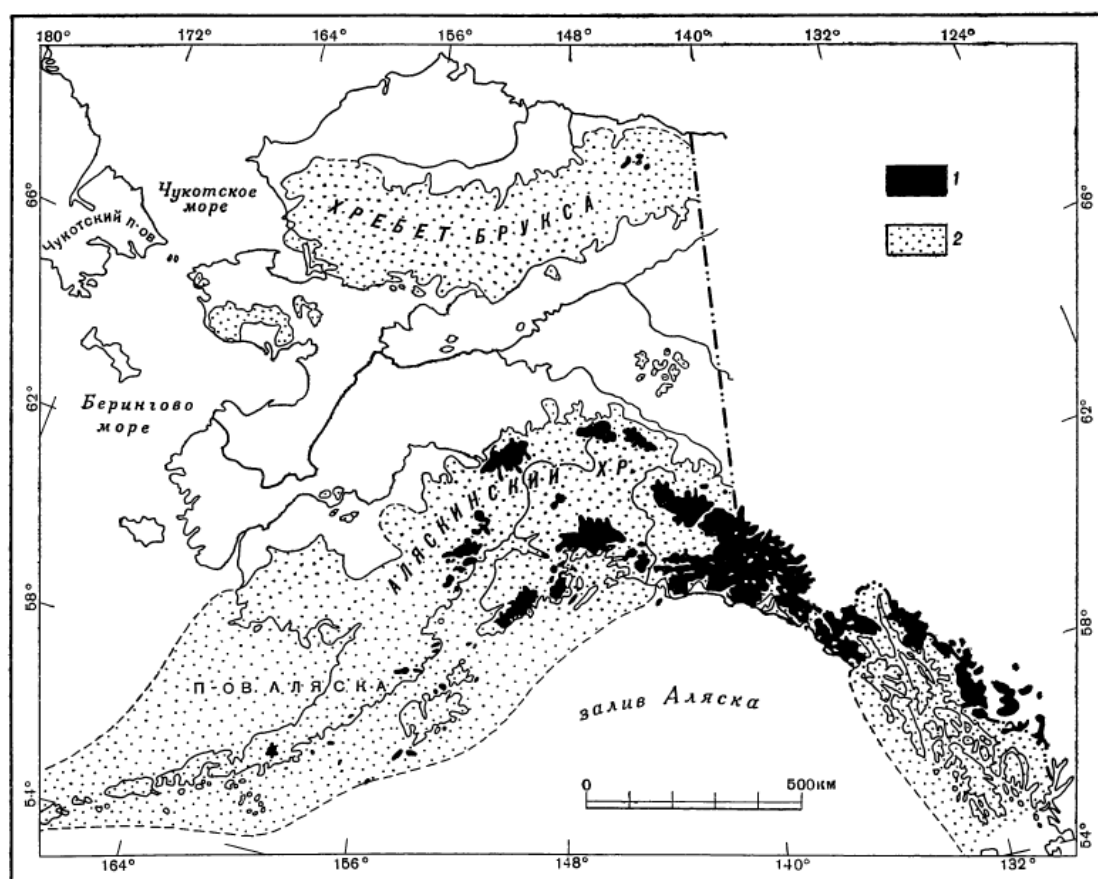


Qg — ледниковые и другие отложения районов сильного оледенения гор альпийского типа; *Qgl* — ледниково-озерные отложения больших плейстоценовых перигляциальных озер; *Qu* — нерасчлененные отложения возвышенностей и низменностей, не подвергавшихся оледенению; *Qa* — аллювиальные отложения; *Qe* — эоловые отложения; *Qs* — смешанные прибрежные отложения морского и континентального происхождения. Участки, закрашенные черным цветом, — вулканические отложения третичного и четвертичного возраста.

Рис.8. Схематическая карта четвертичных отложений Аляски (по (Karlstrom, 1960), с дополнениями Т. Певе и его соавторов (Pewe и др., 1999))

Ледниковые отложения.

На Аляске известны отложения по крайней мере четырех крупных плейстоценовых оледенений (рис.9). В иллинойское, висконсинское и голоценовое время ледники были значительно обширнее в южных районах Аляске, чем в северных, а также гораздо мощнее на южных склонах, чем на северных. Это связано с тем, что питание ледников осуществлялось главным образом за счёт влаги воздушных масс, перемещавшихся в северном и северо-восточном направлениях из северной части Тихого океана.



1 — районы современного оледенения; 2 — районы, подвергавшиеся одному или нескольким оледенениям в четвертичном периоде.

Рис.9. Карта четвертичных оледенений Аляски (Coulter и др., 1968).

Раннеплейстоценовые оледенения

Ледниковые отложения раннеплейстоценового возраста известны на отдельных участках большинства районов Аляски, подвергавшихся оледенениям. Вдали от побережья залива Аляска эти отложения представлены эрратическим валунами или моренными суглинками. Раннеплейстоценовые ледниковые отложения почти нигде не поддаются расчленению.

Иллинойское оледенение

Ледниковые отложения иллинойского возраста присутствуют почти во всех районах Аляски, подвергавшихся оледенениям. Ледники западной Аляски в иллинойское время

были значительно обширнее, чем при висконсинском оледенении. Степень сохранности первичного микрорельефа разная, чаще всего сохраняются лишь общие черты рельефа (цирки, U-образные долины, главные моренные гряды, флювиогляциальные террасы), более мелкие черты рельефа (мелкие моренные гряды, камы, озы) скрыты из-за осадения коллювия с близлежащих склонов или рассечены оврагами. Иллинойские морены формируют крупные, плавно округлённые гряды с нерегулярными гребнями и пологими склонами, которые лишены первичного микрорельефа и которые пересекают овраги с интервалом около 1 км (Pewe и др., 1999).

В районе залива Кука иллинойское оледенение представлено вывертелым материалом. В окрестностях Анкориджа это, прежде всего, выветренные морены, илы, пески и галечники оливково-рыжевато- и жёлто-бурого цвета. У Нома (юго-запад Аляски) и на берегах залива Коцебу (северо-запад Аляски) иллинойские морены приобрели в результате выветривания бледно-оливковый и серовато-жёлтый цвет. На иллинойских озах арктические бурые почвы хорошо выражены, имеют мощность свыше 1,7 метров. Также отмечено высокое содержание выветрелых обломков гранитных пород в приповерхностных зонах иллинойских ледниковых отложений (Pewe и др., 1999).

Висконсинское оледенение

Ледниковые отложения висконсинского возраста встречаются почти во всех горных районах Аляски. Они отсутствуют только на побережье залива Аляска между мысом Св. Ильи и заливом Якутат. Предполагают, что прибрежные горы севернее этого участка были в висконсине ниже, чем в настоящее время, и поэтому на них развивались ледники меньших размеров.

К северу от Аляскинского хребта ледники были преимущественно альпийского типа, они заполняли горные долины и местами были распространены в предгорьях. При этом центральная и северная Аляска была практически свободна ото льда.

Первичный аккумулятивный рельеф висконсинского возраста хорошо сохранился и имеет чёткие очертания, его ледниковое происхождение не вызывает сомнений.

На склонах центральной и западной Аляски курумы, горно-долинные ледники и солифлюкция были активны на более низких высотах, чем в настоящее время. Разрушенная в результате морозного выветривания порода распространена на южной и северной стороне Аляскинского хребта, а также на полуострове Сьюард и острове Святого Павла (Hopkins, 1972). Также в висконсинское время из-за широкого распространения многолетней мерзлоты и слабого дренажа характерна большая заболоченность нижних склонов холмов и русел небольших ручьев, торфяные пласты встречаются на дне долин.

Неледниковые отложения

Неледниковые четвертичные породы состоят в основном из неуплотнённого песка, гравия, вулканического пепла, лёсса, переотложённого лесса и органических отложений.

Эоловые отложения

Эоловые отложения, главным образом позднеплейстоценового возраста, покрывают большие участки низменных равнин Аляски. В основном они представлены лёссом и переотложенным лёссом (переотложение материала флювиогляциальных равнин), которые распространены на больших площадях; менее распространены закреплённые песчаные дюны (Арктическая прибрежная равнина, о. Св. Павла, дельта Юкона) и активные дюны (долины рек Коюкук и Кобук), развитые на небольших участках.

Лёсс, вероятно, наиболее широко распространён среди четвертичных отложений Аляски, образуя покров различной мощности (от 1 см до 60 м и более - наиболее мозные отложения представлены в центральной и западной Аляске). Основная масса лёсса была отложена в иллинойское и висконсинское время. Лёсс Аляски по текстуре и цвету похож на лёсс других районов земного шара: 80-90% этой породы составляют частицы размером менее 0,005 мм. Ближе к речным поймам лёсс более грубого состава, он неслоист, образует отвесные стенки (Реве и др., 1999).

Озёрные отложения

Озёрные отложения четвертичного возраста в основном широко распространены в бассейне реки Коппер-Ривер и в районе залива Кука. Во многих местах они состоят из тонкослоистых, ритмически переслаивающихся песков, алевроитов и глин с прослоями вулканических пеплов. В сухом состоянии слоистые алевроитовые и глинистые отложения разбиты трещинами на отдельные блоки. Иногда отложения содержат грубые осадки, содержащие камни, принесённые льдами (Nichols, 1960)

Аллювиальные отложения

25% территории Аляски покрыто аллювиальными отложениями (если учитывать и те, которые погребены под лёссами). Они встречаются не только в современных поймах рек, но и в гигантских флювиогляциальных конусах у подножия большинства основных горных хребтов. Мощность аллювиальных отложений в тектонических впадинах (долины рек Кускоквим и Танана, Юконская равнина и Юконо-Коюкукская низменность) может достигать несколько сотен метров. Наиболее обширный район распространения аллювиальных отложений – это "Юконская равнинная кайнозойская впадина", состоящая из Юконской равнины с многочисленными поймами, таррасами, аллювиальными конусами, песчаными дюнами, и краевой возвышенности, которая сложена мощной

толщей более древнего аллювия Юкона и его притоков, а также включает отложения конусов выноса небольших потоков, текущих с соседних гор (Реве и др., 1999).

Морские отложения

Большая часть северной и западной Аляски от канадской границы до реки Кускоквим, а также северо-западные берега Аляски окаймлены прибрежными низменностями. Они сложены трансгрессивными и регрессивными толщами морских отложений. На южном побережье Аляски располагается ряд абразионных террас в основном голоценового возраста, а также сильно дислоцированные раннечетвертичные морские отложения. Местами южное и юго-восточное побережье Аляски расчленено фьордами и заливами. Всего на побережье Аляски в течение четвертичного периода насчитывают 7 трансгрессий (Реве и др., 1999).

Глава 3. Системно-морфологический подход А.Н.Ласточкина: геотопологические параметры и их геоэкологическое значение

В качестве методологической базы исследования использовался системно-морфологический подход А. Н. Ласточкина (Ласточкин, 2011). Отправной точкой системно-морфологического подхода является дискретизация поверхности, то есть ее деление на ограниченное число однозначно выделяемых геометрических элементов: характерные точки, структурные линии и элементарные поверхности. Дискретность земной поверхности осуществляется путем анализа четырех геоморфологических функций: 1) высоты или глубины; 2) уклона (первая производная высоты/глубины); 3) вертикальной кривизны (вторая производная высоты/глубины); 4) горизонтальной кривизны. Анализ четырёх геоморфологических функций позволяет провести структурные линии и выделить некоторые характерные точки, которые лежат вне структурных линий. Остальные характерные точки выделяются как точки пересечения структурных линий, а элементарные поверхности – как пространства между границами.

Структурные линии (СЛ) можно разделить на пять основных категорий (приложение 1): 1) гребневые линии (L1) - линии, проходящие через максимумы высоты или минимумы глубины; 2) килевые линии (L2) - линии, проходящие через минимумы высоты или максимумы глубины; 3) линии выпуклых перегибов (L5); 4) линии вогнутых перегибов (L6); 5) морфоизографы (L7) - линии, проходящие через нулевые значения горизонтальной кривизны. Первые четыре вида являются элементарными геоморфологическими границами в профиле, то есть они делят склон на его составляющие; пятый вид линий – морфоизографы – очерчивает элементарные поверхности в плане. При дефиците топографической информации выделяются также линия максимальных уклонов (L3) и линия минимальных уклонов (L4). По форме в плане структурные линии делятся на выпуклые, вогнутые и прямолинейные.

Геоэкологическое значение структурных линий:

- Гребневая линия (L₁) – главная разделительная линия, от нее все потоки идут в разные стороны, самая устойчивая линия (из-за нулевой эрозии), разделяет элементарные поверхности с противоположными экспозициями.
- Килевая линия (L₂) – разъединительная линия, элементарные поверхности по обе стороны имеют разные экспозиции, наблюдается максимальное влияние антропогенных процессов. Устойчива за счет максимальной эрозии
- Линия максимальных уклонов (L₃) – линия максимального транзита, минимальной аккумуляции, влажности, неустойчивая, «чистая» линия.

- Линия минимальных уклонов (L_4) – линия притормаживания потоков, относительной аккумуляции, более увлажненная, более «грязная» линия.
- Линия выпуклых перегибов (L_5) – устойчива, потоки набирают скорость, вынос преобладает – «чистая» линия.
- Линия вогнутых перегибов (L_6) – неустойчива, «грязная», но также сносятся и «полезные» элементы – органика, железо и т.д. – образуются почвы.
- Морфоизографа (L_7) – линии равной кривизны; делят выпуклые и вогнутые в плане участки склонов, наименее заметные в природе и на карте. Разделяемые ими участки отличаются по устойчивости, стоку и даже по почвообразованию.

Характерные точки (ХТ) выделяются как всевозможные пересечения и сочленения структурных линий; а также точки положительных и отрицательных вершин, которые лежат вне структурных линий, и точки ундуляций (изгибов) килевых и гребневых линий (приложение 2):

- "Выпуклые" – пересечения и сочленения линий L_1 и L_5 , а также вершины положительных форм и ундуляций гребневых линий.
- "Вогнутые" – пересечения и сочленения линий L_2 и L_6 , а также вершины отрицательных форм и ундуляций килевых линий
- "Выпукло-вогнутые" – пересечения и сочленения линий L_1 и L_5 с линиями L_2 и L_6 , а также положительные вершины ундуляций килевых линий и отрицательные вершины ундуляций гребневых линий.

Значение характерных точек: характерные точки соответствуют наиболее динамически интенсивным участкам поверхности. В частности, они обычно связаны с самой высокой или самой низкой концентрацией мигрирующих веществ.

Элементарные поверхности

По относительному вертикальному положению выделяются следующие типы площадных элементов – элементарных поверхностей (приложение 3):

1) Верхние площадные элементы:

- плосковершинные верхние поверхности,
- привершинные верхние поверхности,
- вдольгребневые поверхности;

2) Собственно склоновые поверхности с подразделением их по относительной крутизне (относительно выше- и нижележащих на склоне смежных ЭП) на:

- фасы,
- уступы,
- площадки,
- подножия;

3) Нижние площадные элементы:

- вдолькилевые поверхности,
- привершинные нижние поверхности,
- плоскодонные или плосковершинные нижние поверхности.

Три первых и три последних типа ЭП объединяются в две группы площадных элементов: верхние (группа А) и нижние (группа С). Промежуточное положение между ними в таблице – систематике, так же как в любом конкретном рельефе, занимают собственно склоновые ЭП (группа В).

Значение элементарных поверхностей: по Ласточкину А.Н. (Ласточкин, 2011) : "Фиксация положения площадных элементов относительно ограничивающих их СЛ и важнейших ХТ позволяет однозначно и строго определить, систематизировать и оконтурить площадные элементы, которые отличаются друг от друга не только по своей позиции в конкретном рельефе и по морфологии, но и как следствие этого, — по направленности, интенсивности и другим особенностям создавших и моделирующих их рельефообразующих процессов."

Интенсивность протекания многих экзогенных процессов (в частности, склоновых и флювиальных) зависит от значений геотопологических параметров. В данной работе анализировалось распределение природообусловленных аварий трубопроводов по разным типам элементарных поверхностей со следующими геотопологическими параметрами:

- абсолютная высота — обуславливает изменение климатических факторов (температурный градиент — понижение на $0,5—0,6^{\circ}$ на каждые 100 м поднятия; барический градиент — понижение на 1 мм рт. ст. на каждые 10 м поднятия; меняется прозрачность атмосферы, меняется озоновый слой и количество УФ-радиации; увеличение количества осадков в горах);
- крутизна склона (уклон) — влияет на сток, на количество приходящей солнечной радиации, количество осадков; нарастание интенсивности процессов идёт от склонов с меньшей крутизной к склонам с большей крутизной;
- горизонтальная кривизна — влияет на плотность потоков, влажность, состав почв; вогнутые в плане поверхности - зоны конвергенции потоков, аэродинамические ловушки, а выпуклые - зоны дивергенции, разделяют потоки; устойчивость

склонов возрастает от вогнутых в плане поверхностей к выпуклым; интенсивность процессов увеличивается от вогнутых в плане склонам к выпуклым;

- вертикальная кривизна – влияет на количество вещества (с выпуклых в профиле склонов выносится больше), на влажность (выпуклые в профиле - сухие, вогнутые - влажные); устойчивость склонов возрастает от выпуклых в профиле поверхностей к вогнутым; интенсивность процессов увеличивается от вогнутых в профиле склонов к выпуклым;
- относительная высота – влияет на количество, объём и скорость перемещаемого по склонам вещества и влаги, на количество выпадающих осадков;
- азимут падения склона – определяется направлением линий тока; даёт 2 экспозиции – гравитационную и инсоляционную; определяет положение по отношению к господствующим ветрам и течениям (циркуляционную экспозицию).

Также в анализ были введены такие геоморфологические характеристики, как: приуроченность к тому или иному типу элементарной поверхности (в соответствии со систематикой элементов земной поверхности Ласточкина А.Н. (Ласточкин, 2011) и близость к структурной линии, геоэкологическое значение которые описано выше.

Глава 4. Создание базы данных аварий трубопроводов в трёх штатах США и измерение геотопологических параметров элементарных поверхностей на репрезентативном трубопроводе

Создание базы данных аварий трубопроводов в трёх штатах США

Данная работа основана на информации из базы данных об авариях трубопроводов на территории США Национальной системы картографирования трубопроводов США (The National Pipeline Mapping System – NPMS), выложенной в Интернет (Официальный сайт Национальной системы картографирования трубопроводов США. URL: <http://pvnpm.phmsa.dot.gov/PublicViewer/>).

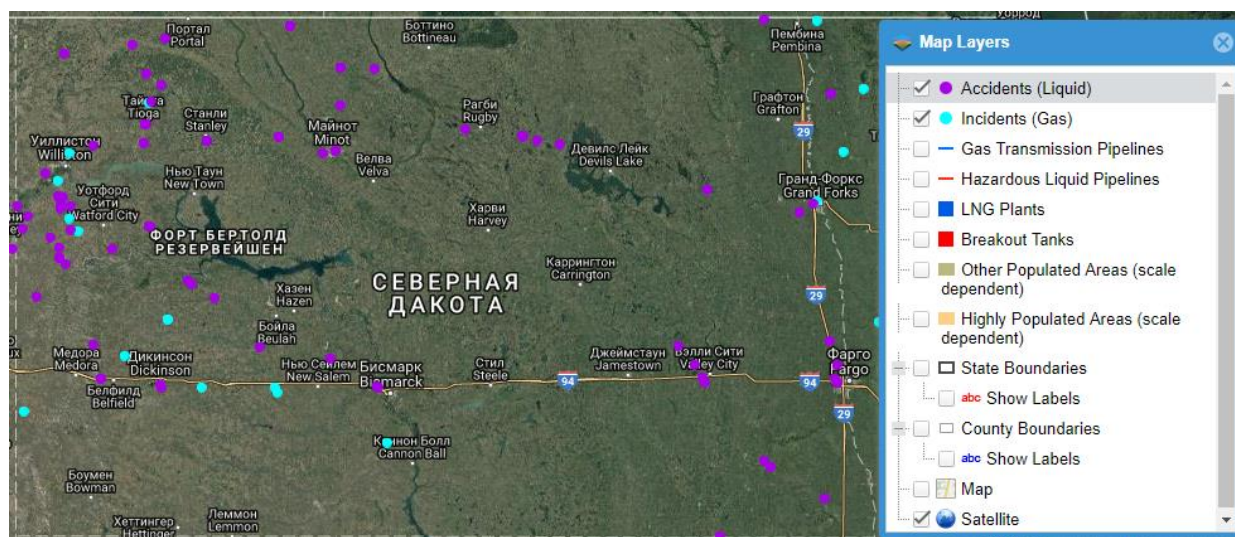


Рис.10. Информационный слой из Национальной системы картографирования трубопроводов США (The National Pipeline Mapping System – NPMS) (Официальный сайт Национальной системы картографирования трубопроводов США. URL: <http://pvnpm.phmsa.dot.gov/PublicViewer/>).

Доступ к базе осуществляется посредством интерактивной карты, на которой отображены аварии на нефтепроводах и газопроводах (рис. 10). При изучении отдельных округов каждого штата есть возможность увидеть сами маршруты газопроводов и нефтепроводов, станции перекачки сжиженного газа, нефтеперекачивающие станции, а также получить доступ к протоколам аварий, в которых указаны их причины, даты, тип топлива и другая техническая информация.

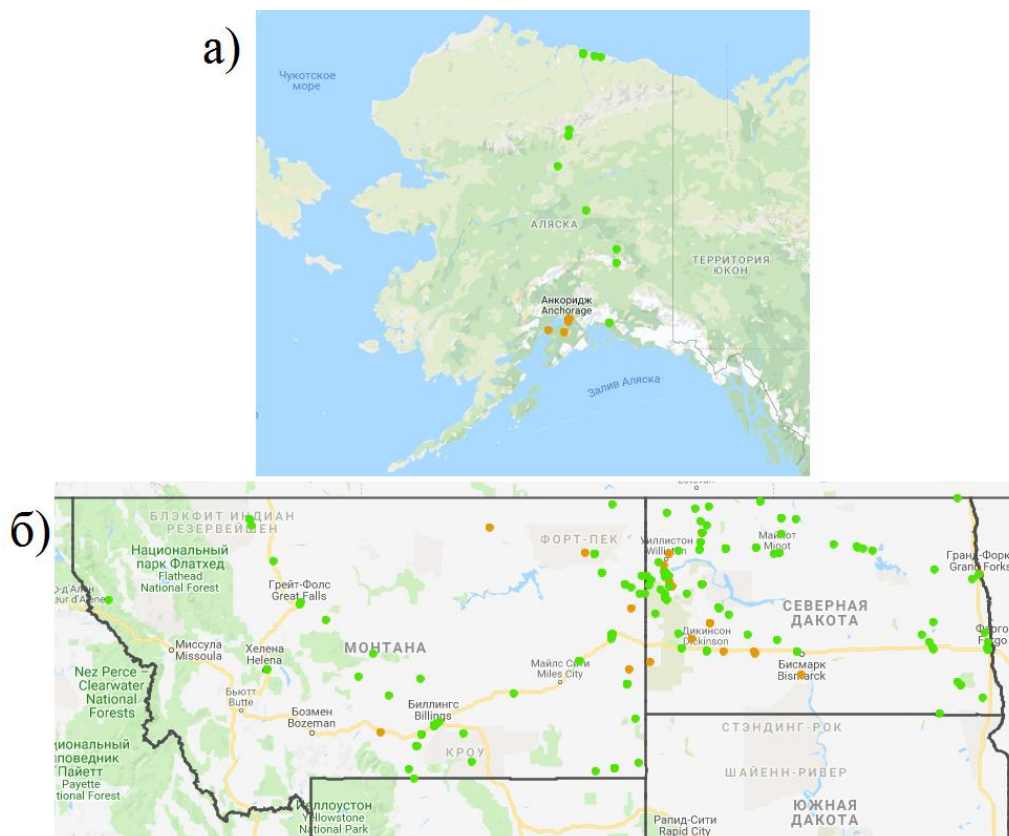


Рис.11. Карта аварий на трубопроводах (2002-2017 гг.) : а) Аляски; б) Монтаны и Северной Дакоты. Зелёные точки – аварии на нефтепроводах, оранжевые точки – аварии на газопроводах.

Для анализа были использованы данные по штатам Монтана, Северная Дакота и Аляска, чьи природные условия сходны с природными условиями большей части территории России. Все точки (рис.11) были перенесены в программу SAS.Planet, которая позволяет работать с большим количеством картографических online-серисов. Использовались топографические карты ESRI (USA_Topo_Maps) с целью изучения распределения аварий по различным геотопологическим показателям (абсолютная высота, крутизна, вертикальная кривизна, горизонтальная кривизна, относительная высоте склона, близость к структурным линиям и тип элементарной поверхности), а также космические снимки картографического сервиса Bing Maps. Производились картометрические измерения (рис.12), все результаты заносились в электронную базу в программе Excel (рис.13).

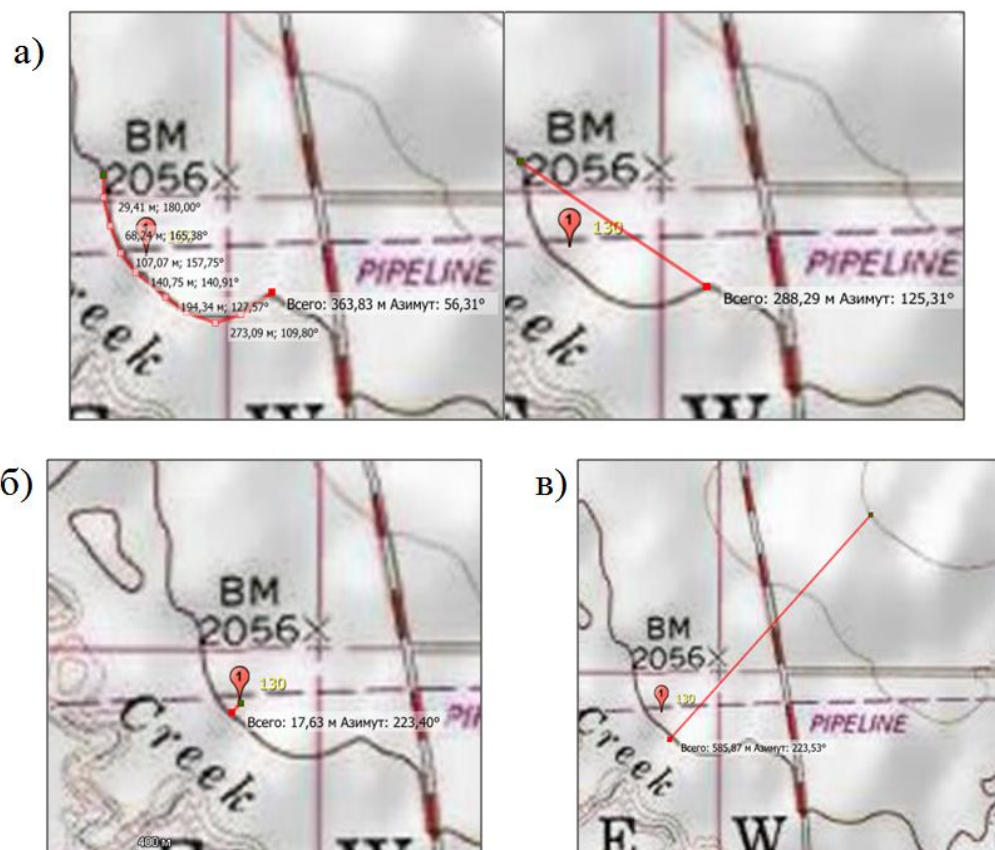


Рис.12. Картометрические измерения в программе SAS.Planet с использованием топографических карт ESRI (USA_Топо_Maps): а) измерение горизонтальной кривизны; б) измерение расстояния до структурной линии; в) измерение азимута падения склона

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
	Точка	Округ	Широта	Долгота	Топливо	OPID	NAME	LOCAL_DATETIME	CAUSE	Горизонт. кривизна	Вертик. кривизна	Азимут пад.	Относит. Высота	Длина поверхности ост(м)	Близость к СП	СП	поверхн. ость	Абс. высота	Уклон 1	Уклон 2	Описание		
1	59	Yellowst	45,812	-108,441	нефть	4906	EXX P CO	07.07.2006	MWE F	-	-	-	-	-	0	2 2-5	1010	0	-	-	посёлок Локвуд, вблизи не		
2	72	Yellowst	45,6555	-108,757	нефть	4906	EXX P CO	01.07.2011	NFD	-	-	-	-	-	0	2 2-5	1092	0	-	-	побочень р.Йеллоустон, о		
3	94	Cass	46,8783	-96,8811	нефть	22610	MPC, LP	07.12.2010	NFD	1	1	272	2	1477	-	-	6-5	300	0	-	станция, плоская площадк		
4	104	Grand Fo	47,8822	-97,2122	нефть	15774	ENB P	07.04.2013	MWE F	1	1	36	40	14682	615	6 6-6	286	0,001	-	-	плоская площадка 1-ой н/		
5	67	Yellowst	45,7787	-108,489	нефть	31684	CONOCO	09.10.2007	CORROSI	1,64	1,38	84	13	3185	534	5 6-5	1037	0,004	-	-	нефтеперерабатывающий		
6	16	Carbon	45,141867	-109,008	нефть	4906	EXX P CO	20.11.2018	CORROSI	1	2,24	57	26	2178	240	5 6-5	1270	0,0056	-	-	город Белфри, станция; сл		
7	41	Glacier	48,71349	-112,355	нефть	32283	FRP, LLC	10.06.2016	CORROSI	-	-	309	3	1185	335	6 6-5	1259	0,006	-	-	станция(резервуар); поло		
8	163	Kenai Pe	60,7807	-151,439	газ	32645	HILCORP	07.02.2017	NFD	1	1	-	-	-	-	-	6-	-24	0,006	-	-	подводная прокладка газ	
9	169	North Sic	70,2576	-148,619	нефть	26149	ALYESKA I	08.01.2011	CORROSI	1	1	-	-	806	272	6 6-	7	0,006	-	-	станция с резервуарами, е		
10	130	Morton	46,8473	-101,783	газ	22655	WET, INC	23.12.2013	NFD	1,22	0,59	223	10	815	17	6 6-6	684	0,008	-	-	станция, 1-ая н/п терраса		
11	79	Benson	48,3234	-99,6141	нефть	15774	ENB P	02.05.2013	MWE F	1,92	2,2	329	6,66	601	23	6 6-7	547	0,009	-	-	вблизи дороги, очень поло		
12	143	Renville	48,9657	-101,649	нефть	15774	ENB P	20.08.2010	CORROSI	-1,42	1,82	52	5	1317	13	5 5+	550	0,009	-	-	станция вблизи города Ше		
13	170	North Sic	70,1076	-147,386	нефть	-	-	-	MWE F	-1,12	1	-	1,33	1710	27	5 4+	8	0,009	-	-	термокарстовые озёра р		
14	2	Roosevel	48,233651	-105,1289	нефть	31878	BP LLC	26.10.2006	CORROSI	1	1,4	275	16	1522	223	5 6-5	603	0,01	-	-	нефтяные резервуары; по		
15	40	Fergus	46,816231	-109,764	нефть	31720	EXP H, LLC	10.01.2017	NFD	1,1	0,85	305	73	3962	378	5 6-6	1333	0,01	-	-	станция(резервуар); накл		
16	140	Ransom	46,4138	-97,5225	нефть	32258	KIN M C L	13.04.2011	NFD	1	1	105	10	1959	580	6 6-5	371	0,01	-	-	в 400 м от нефтерегулятор		
17	81	Benson	48,279	-99,304	нефть	15774	ENB P	26.01.2013	MWE F	1	1	128	3,3	215	100	5 6-5	502	0,013	-	-	вблизи дороги, очень поло		
18	96	Divide	48,8051	-103,617	нефть	39012	SMP, LLC	17.10.2017	NFD	-1,07	0,87	173	6,66	525	15	5 6-5	767	0,013	-	-	станция, плоская поверхн		
19	134	Mountra	48,5243	-102,857	нефть	31570	THP PC LL	29.07.2013	NFD	1,5	0,4	122	23,3	1380	405	6 5-6	791	0,014	-	-	станция(? без резервуаро		
20	78	Benson	48,3311	-99,6315	нефть	15774	ENB P	15.07.2013	MWE F	1	0,92	277	6,66	624	91	6 6-6	535	0,015	-	-	вблизи дороги(пересечени		
21	5	Richland	47,805531	-104,483	нефть	39440	DOUBLE H	02.04.2017	NFD	1,099	1,77	69	33,3	1390	470	1 1-6	840	0,018	-	-	нефтяные резервуары; се		
22	136	Nelson	48,015	-98,0103	нефть	-	-	-	MWE F	1	1	-	-	-	-	-	6-	507	0,018	-	-	вблизи пересечения дорог	
23	156	William	48,3969	-102,91	нефть	31570	THP PC LL	13.03.2014	NFD	2,06	0,55	190	23,3	98	0	1 1-6	741	0,019	-	-	завод вблизи г.Тайюга; водо		
24	153	Ward	48,2413	-101,255	нефть	15774	ENB P	13.11.2012	CORROSI	1,15	0,7	221	25	998	388	6 0-6	545	0,023	-	-	станция с резервуарами в		
25	12	Big Horn	45,663331	-104,45	нефть	31720	THP PC LL	21.09.2006	MWE F	-1,3	4,32	43	23	545	91	1 1-6	1033	0,025	-	-	верхняя часть выкульного		
26	48	Phillips	48,595851	-107,3238	газ	13769	NBPC	05.07.2011	MWE F	-2,51	1,06	149	86	4369	52	2 0-6	820	0,025	-	-	пологонаклонный уступ во		
27	39	Fallon	46,390101	-104,45	нефть	1960	BU P CO	24.11.2014	CORROSI	-1,26	0,79	85	21	1378	621	5 1-5	959	0,027	-	-	нефтеперерабатывающий		
28	47	Mussel	46,456381	-108,7805	нефть	31684	CON INC	09.12.2009	MWE F	-1,18	0,406	63	67	198	90	5 6-5	1160	0,029	-	-	1-ая надпойм. Терраса, в		
29	101	Calder	46,204	-102,965	газ	32655	WILCO	20.12.2014	NFD	1,12	0,73	41	4,0	1000	36	6 5-6	840	0,024	-	-	вблизи линии электропере		

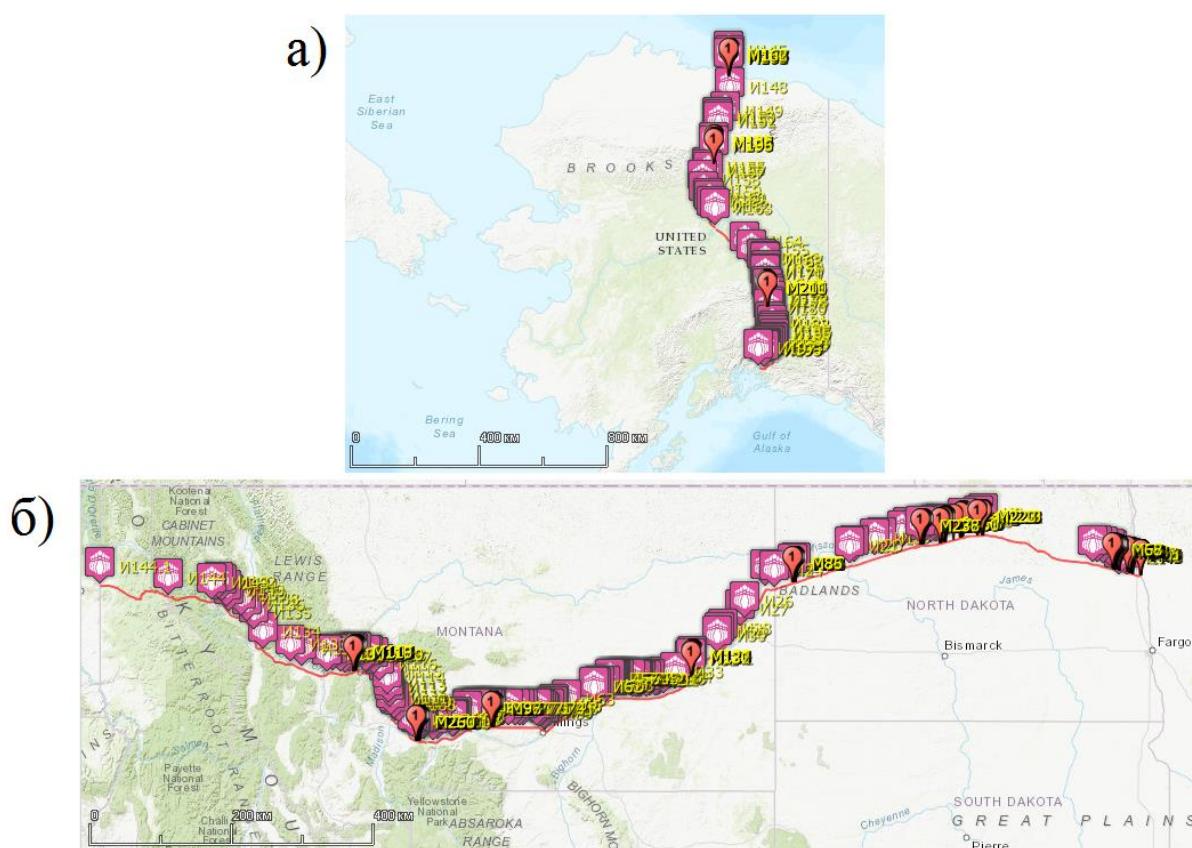
Рис.13. Фрагмент созданной базы аварий. Жёлтым выделены аварии вне нефтеперекачивающих станций, заводов, резервуаров и т.д., синим - "природные аварии" (причины "Повреждение природными силами" и "Коррозия"), голубым - аквальные аварии).

Всего в период с 2002 по 2017 года на территории северных штатов США произошло 177 аварий (21 на газопроводах и 156 на нефтепроводах и нефтепродуктопроводах). Были проанализированы аварии, причины которых четко указаны в официальной статистике: природные, коррозия, дефекты труб и оборудования и др. Использовались статистические методы обработки информации. Число аварий, где в акте технического расследования в качестве причины указаны "Повреждение природными силами", составило 18 (10,17% от всех аварий на трубопроводах США за период 2002–2017 гг.). Коррозия также является фактором, в котором велика доля природной составляющей, аварий по причине коррозии было выделено 11 (6,21%). Также к природным авариям были отнесены аварии, основной причиной в акте технического расследования которых был указан неприродный фактор (не "Повреждение природными силами" и не "Коррозия", а, например дефект "Материала/сварки/оборудования"), но которые расположены вдали от нефтеперекачивающих станций и заводов. Таких аварий выделено 19 (10,73%). Таким образом, общее число аварий, где имел место или мог иметь место природный фактор для трубопроводов севера США составило 48 или 27,12%.

Измерение геотопологических параметров элементарных поверхностей на репрезентативном трубопроводе

В процессе обработки базы данных аварий и анализа распределения аварий по геоморфологическим характеристикам было установлено, что большинство аварий произошло в местах с ординарными, а не экстремальными значениями геоморфологических параметров: на горизонтальных поверхностях, а не на крутых; на прямолинейных в плане и профиле склонах, а не выпуклых и вогнутых; на площадках, а не уступах, фасах или подножьях (приложения 4-8). Однако, этот факт можно объяснить тем, что трубопроводы чаще всего и прокладывают в наиболее безопасных местах, то есть суммарная длина трубопроводов, например, на выровненных поверхностях, значительно больше, чем на крутых склонах. Поэтому было принято решение ввести величину удельной аварийности трубопроводов, которая выражается в количестве аварий с определённым значением геотопологического параметра на длину репрезентативного трубопровода, проходящего по элементарным поверхностям с таким же значением геотопологического параметра (количество аварий/длина трубопровода в метрах). В качестве репрезентативного был выбран трубопровод, протягивающийся через штаты Монтана и Северная Дакота с запада на восток и таким образом пересекающий различные природные зоны, простирающиеся субмеридионально (Амосов М. И. и др., 2011). В

Аляске были проанализированы элементарные поверхности, по которым проходит Трансаляскинский нефтепровод. Суммарная длина репрезентативного трубопровода (проходящего через три штата) составила свыше 2847 километров, поэтому были выделены небольшие репрезентативные участки на этом трубопроводе для более детального измерения геотопологических параметров, которые впоследствии были вручную экстраполированы на весь трубопровод (рис.14). Вся информация также заносилась в базу данных (рис.15). Количество репрезентативных участков – 15 (общее количество элементарных поверхностей, которые были описаны на них – 203), количество экстраполированных участков – 189.



	Экстраполируемый участок	Репрезентативный участок	Уклон общий	Горизонт. кривизна	Вертик. кривизна	Относит. Высота	Элементарная поверхность	Длина, м	Доли	Экстраполированные длины	Проверка
	I1-I2	M13-M27	+	+	+	+	+	11353	5912		11353
Длина экстраполируемого участка I1-I2	M13-M14	0,25	1	1	1	1 5-2	4	0,000677	7,681326	Сумма экстраполированных длин	
	M14-M15	0,25	1	1	1	1 5-2	4	0,000677	7,681326		
	M15-M16	0,001	1	1	1	1 6-5	898	0,151894	1724,468		
	M16-M17	0,011	1,26	-	1	2 1-6	250	0,042287	480,0829	Длина репрезентативного участка M13-M27	
	M17-M18	0,002	1,7	-	1	1 1-6	363	0,061401	697,0803		
	M18-M19	0,032	-	-	1	2 6-5	62	0,010487	119,0606		
	M19-M20	0,083	1	1	1	1 5-2	12	0,00203	23,04398	Длины элементарных поверхностей 5-2, 5-2, 6-5 и др. на экстраполируемом участке I1-I2	
	M20-M21	0,083	1	1	1	1 5-2	12	0,00203	23,04398		
	M21-M22	0,08	1	1	1	2 6-5	25	0,004229	48,00829		
	M22-M23	0,2	1	1	1	2 5-6	10	0,001691	19,20332		
M23-M24	0,0006	1	1	1	1 6-5	1400	0,236806	2688,464			
M24-M25	0,16	1	1	1	1 5-2	6	0,001015	11,52199			
M25-M26	0,16	1	1	1	1 5-2	6	0,001015	11,52199			
M26-M27	0,005	1	1	1	2 6-5	2860	0,483762	5492,148			
Длины элементарных поверхностей 5-2, 5-2, 6-5 и др. на репрезентативном участке M13-M27								Доли длин элементарных поверхностей репрезентативного участка M13-M27 от общей длины репрезентативного участка M13-M27			

Рис.15. Фрагмент базы данных с экстраполяцией репрезентативных участков.

В результате было выявлено распределение элементарных поверхностей и их геотопологических показателей на всей протяжённости репрезентативного трубопровода, которое впоследствии использовалось для расчёта удельной аварийности трубопровода.

Глава 5. Распределение природообусловленных аварий трубопроводов по геолого-геоморфологическим параметрам элементарных поверхностей

Статистическая обработка проводилась в программе Excel. Для распределения по геоморфологическим характеристикам были выполнены ранжирование рядов (от наименьшего значения параметра к наибольшему), группировка данных каждого ранжированного ряда в градации (интервалы группировки) с использованием эмпирического правила (формула Сёрджеса), по которому число градаций K должно приблизительно равняться:

$$K = 5 \log N, \text{ где } N - \text{число наблюдений.}$$

Длина интервалов L определялась как разность между наибольшим значением параметра X_{\max} и наименьшим X_{\min} , делённая на количество градаций K :

$$L = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{K}$$

Далее была подготовлена таблица для построения гистограмм распределения. Значения переменной X (геоморфологического параметра) откладывались по оси абсцисс, а удельная аварийность или абсолютное количество аварий по оси ординат.

5.1. Анализ распределения природообусловленных аварий по геоморфологическим характеристикам элементарных поверхностей

Распределение аварий по абсолютным высотам

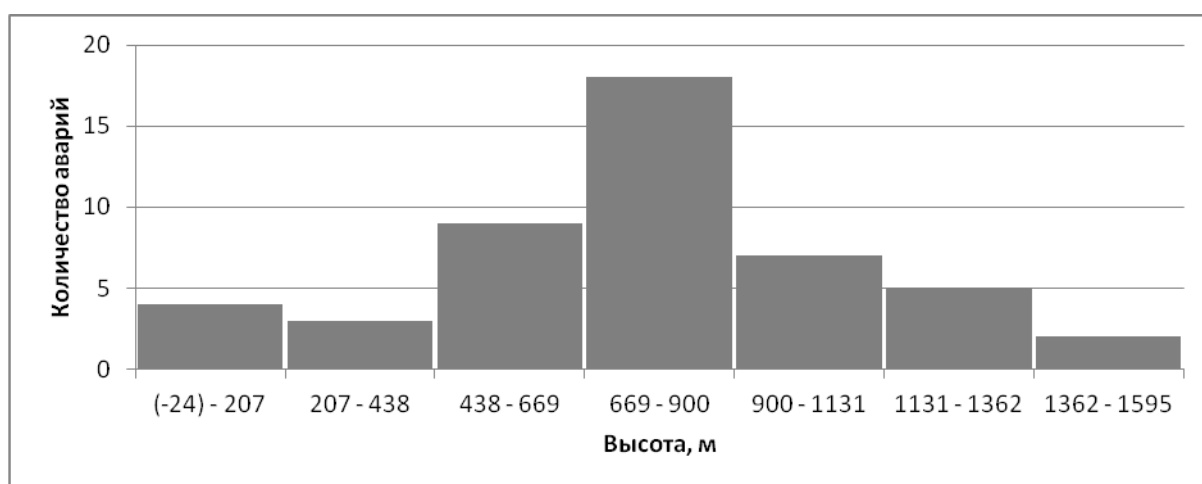


Рис.16. Распределение природообусловленных аварий по абсолютным высотам.

В штатах Монтана и Аляска значительную часть занимают горы, Северная Дакота ниже, но также расположена в пределах возвышенных равнин (200-500 м). Трубопроводы редко проводят на больших высотах: даже в горах они протягиваются вдоль

глубоковрезанных долин, лишь изредка пересекая относительно пологие перевалы. Поэтому вполне закономерно, что большая часть аварий приходится на высоты от 400 до 900 м. Несмотря на не самые большие высоты, здесь достаточно расчлененный рельеф, который способствует повышению количества аварий.

Удельная аварийность на поверхностях с различной относительной высотой

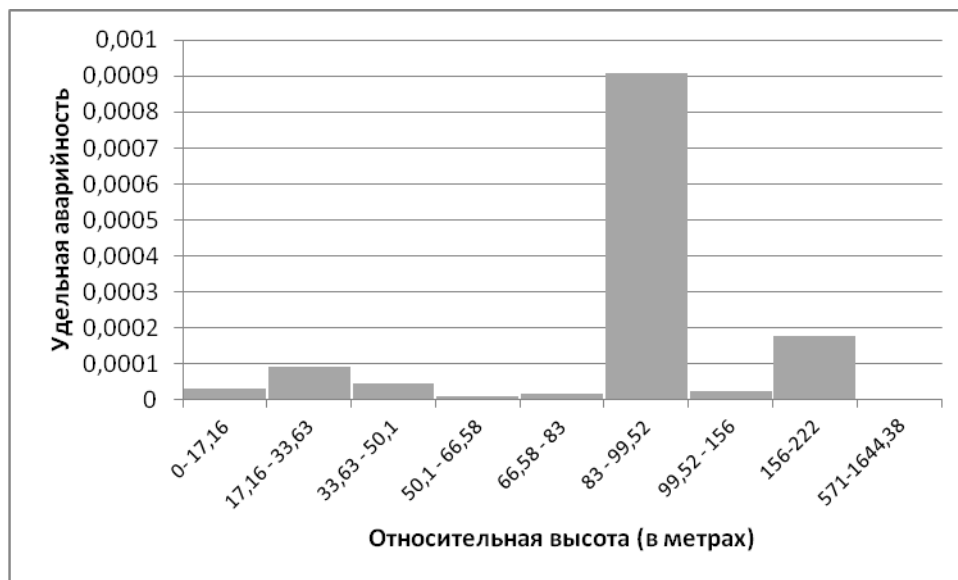


Рис.17. Удельная аварийность на поверхностях с различной относительной высотой

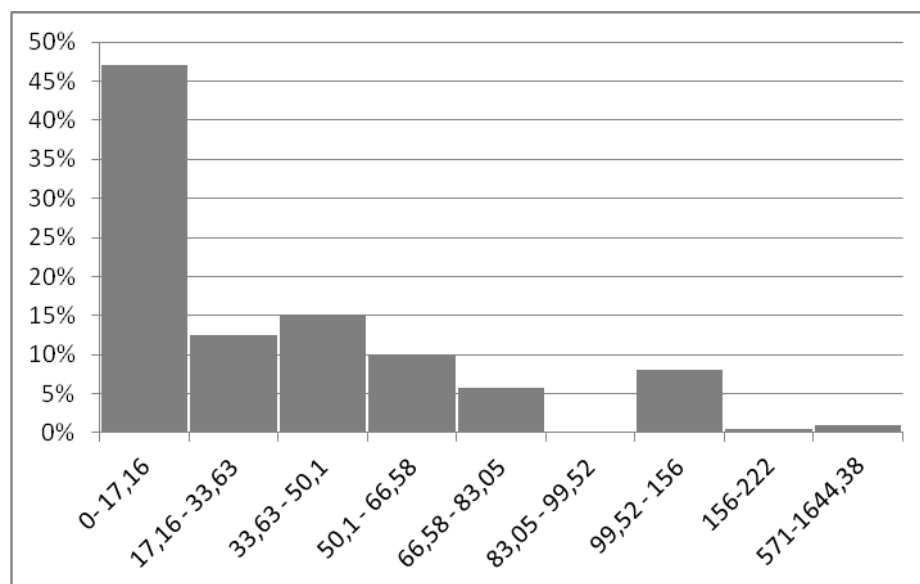


Рис.18. Распределение значений относительной высоты на всей протяжённости репрезентативного трубопровода

Относительная высота влияет на количество, объём и скорость перемещаемого по склонам вещества, на количество выпадающих осадков. Как видно из рисунка 18, трубопроводы в основном прокладывают на склонах с небольшой относительной высотой (0 - 17,16). Рисунок 17 показывает, что наиболее безопасными являются значения относительной высоты меньше 83 метров. Сильно повышенная аварийность наблюдается при относительной высоте 83-99 метров. Именно склоны данной относительной высоты обычно являются крутыми и сильно расчленёнными, что и обуславливает повышенную аварийность. Также выделяется высокая аварийность при относительных высотах 156-222 метра. Данные склоны обычно являются максимально крутыми, с чем также связана повышенная аварийность.

Удельная аварийность на поверхностях с разными уклонами

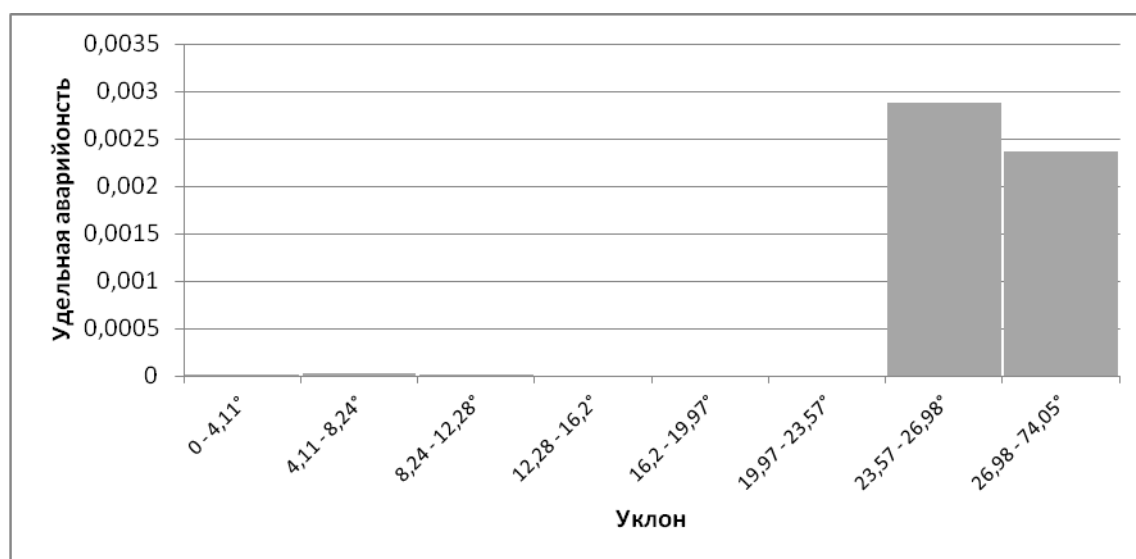


Рис.19. Удельная аварийность на поверхностях с разными уклонами.

Наиболее безопасными для прокладки трубопроводов являются субгоризонтальные поверхности с уклоном до 4° (рис. 19), по этим поверхностям чаще всего и прокладывают трубопроводы (приложение 4). Основные опасности, которые подстерегают трубопроводы, – это повышенное увлажнение, которое приводит к активизации коррозии (не говоря уже о трех подводных авариях – двух речных в Монтане и одной морской на Аляске). Так, аварийность на склонах 4-8° обусловлена максимальной влажностью грунтов и наиболее интенсивным массовым движением грунта (этот же факт отмечал Машков К.А. при изучении факторов аварийности на трубопроводах Удмуртии (Машков, 2007)). На склонах крутизной 12-23° аварийность пониженная, это объясняется тем, что при увеличении крутизны улучшается дренаж склона, уменьшается увлажнённость

грунтов, а значит, и скорость почвенной коррозии (Машков, 2007). Сильно повышенная аварийность на склонах крутизной более 23° объясняется резким изменением давления в трубопроводе. Известно, что с изменением уклона поверхности меняется давление в трубопроводе (при увеличении уклона оно уменьшается, что влияет на транспорт газа), а также с увеличением уклона возрастает вероятность активизации опасных экзогенных процессов на склоне. С этим мнением соглашается А.В.Волков (А.В.Волков, 2009).

Удельная аварийность на поверхностях с различной горизонтальной кривизной

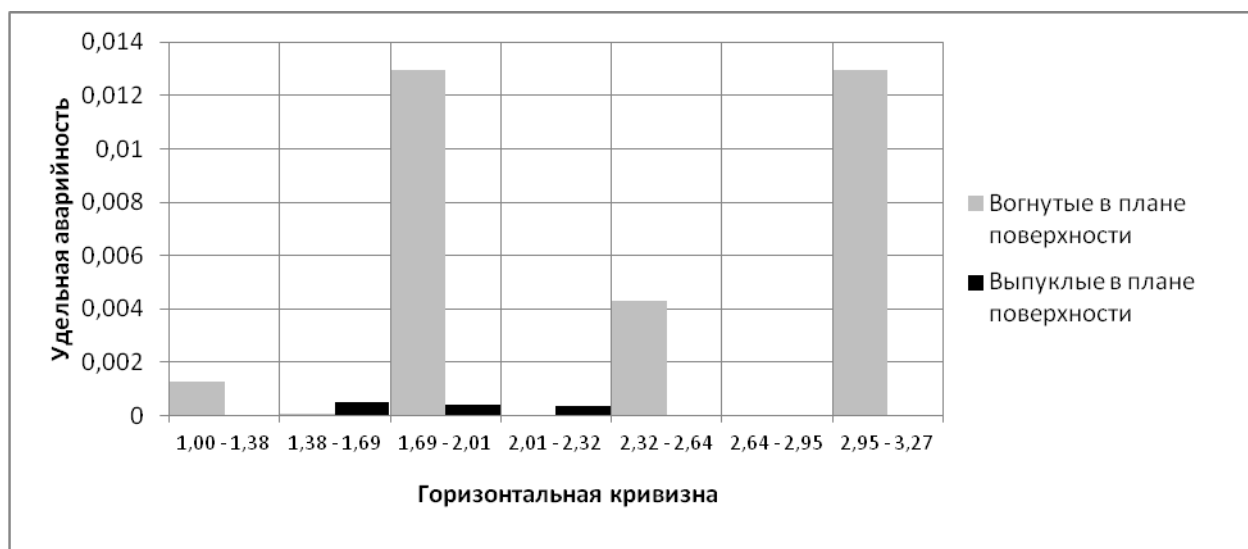


Рис.20. Удельная аварийность на поверхностях с различной горизонтальной кривизной

Наиболее безопасными для трубопроводов являются прямолинейные в плане склоны (по которым чаще всего прокладывают трубопроводы – приложение 5), и, как ни странно, вогнутые и выпуклые в плане склоны с горизонтальной кривизной 2,64-2,95 – за период с 2002 по 2017 года на них не произошло ни одной аварии (рис.20). Связано это с тем, что сильновогнутые в плане склоны обычно имеют весьма значительную горизонтальную протяженность, а также характеризуются отсутствием в их пределах водотока, что несколько скрадывает негативные последствия от интеграции стока. А сильновыпуклые в плане склоны со значительной горизонтальной кривизной заведомо являются наиболее устойчивыми в связи с дезинтеграцией стока и обычно более плотными поверхностными отложениями.

В целом более аварийны вогнутые в плане поверхности, нежели выпуклые, так как суммарная протяжённость вогнутых в плане поверхностей (22495 метров) на порядок меньше суммарной протяжённости выпуклых в плане поверхностей (902324 метра). Аварийность на вогнутых в плане склонах связана с концентрацией стока и предрасположенностью к развитию линейной эрозии и прочих опасных экзогенных

процессов. Аварийность на выпуклых склонах связана со сложным пространственным положением трубы и его возможным отклонением. Однако, по-видимому, вероятность пространственного отклонения трубы на выпуклых склонах гораздо ниже вероятности активизации экзогенных процессов на вогнутых склонах, поэтому на выпуклых склонах аварийность существенно ниже (или вообще отсутствует) аварийности на вогнутых склонах.

Удельная аварийность на поверхностях с различной вертикальной кривизной

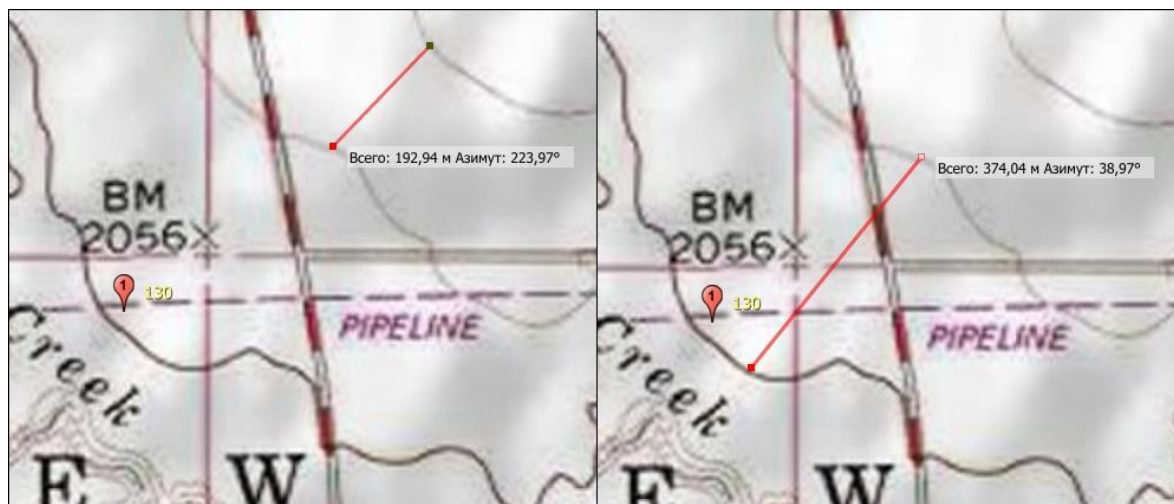


Рис.21. Измерение вертикальной кривизны склона.

Для сравнения аварий по вертикальной кривизне были рассчитаны нетрадиционные значения вертикальной кривизны. Она рассчитывалась как отношение расстояния между верхними горизонталями к расстоянию между нижними (рис.21). Значения, близкие к единице, говорят о прямолинейном в профиле склоне, значения, сильно меньше единицы, свидетельствуют о вогнутом в профиле склоне, а значения, которые сильно больше единицы - о выпуклом.

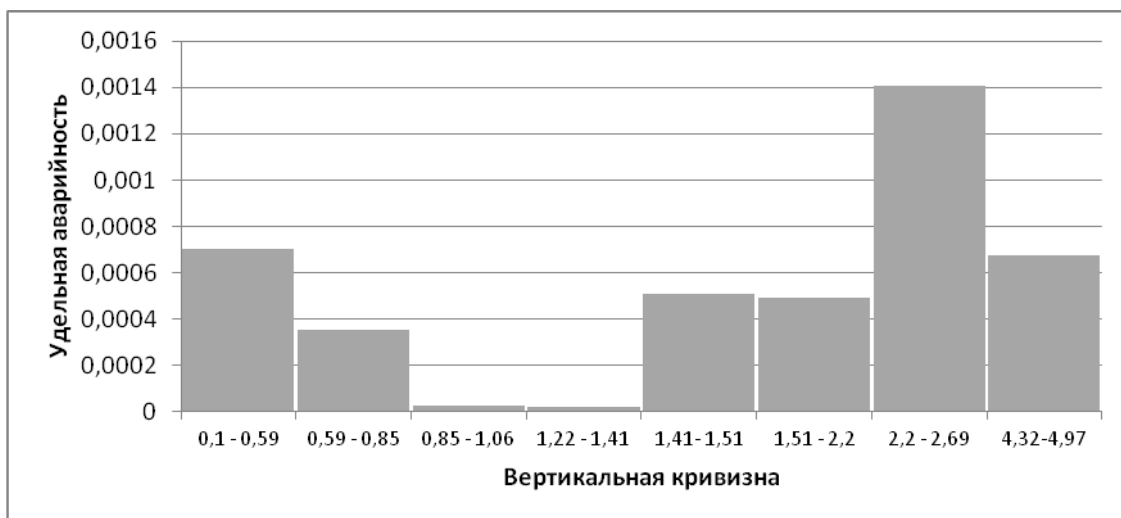


Рис.22. Удельная аварийность на поверхностях с различной вертикальной кривизной.

Наиболее безопасными для трубопроводов являются прямолинейные в профиле склоны (значения 0,85 - 1,06), по которым чаще всего и прокладывают трубопроводы (приложение 6). Существенная доля аварий приурочена к вогнутым, особенно сильновогнутым склонам (значения 0,1 - 0,85), что связано с повышенной влажностью вогнутых склонов по сравнению с прямолинейными. Выпуклые и сильновыпуклые в профиле склоны также аварийноопасны (значения 1,41 - 4,97) из-за интенсивного выноса веществ и потоков (рис.22).

Удельная аварийность на склонах различной экспозиции.

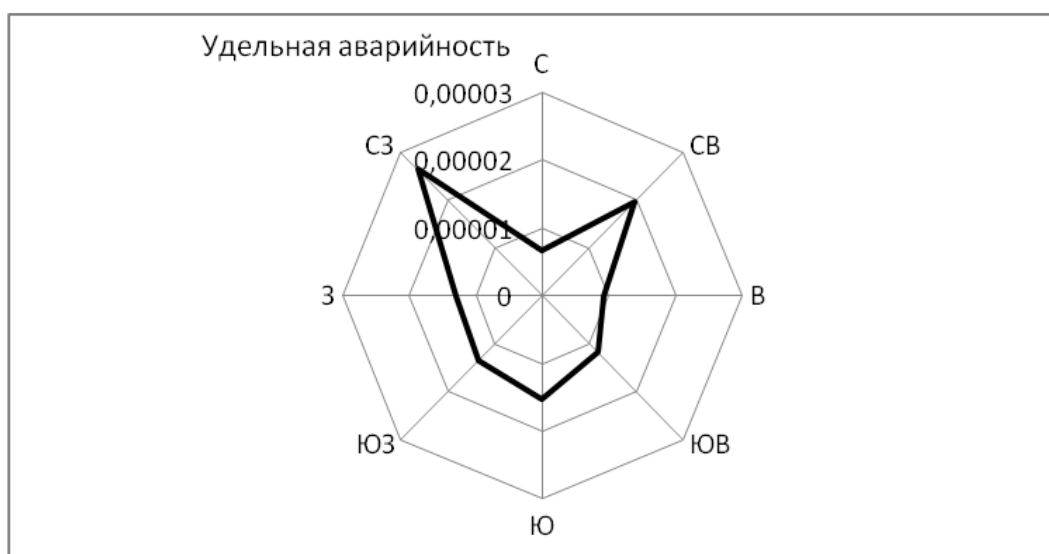


Рис.23. Удельная аварийность на склонах различной экспозиции.

Превалирование аварий на склонах северо-восточной, восточной и северной экспозиций (рис.23) объясняется тем, что северные склоны менее освещены и хуже прогреваются. Восточные склоны получают больше осадков за счет муссонной циркуляции атмосферы в Монтане и Дакоте, юго-западные и западные склоны получают больше осадков на юге Аляски. Повышенная влажность и меньшая теплообеспеченность склонов приводит к возрастанию коррозии. Трубопроводы в северных штатах США чаще проложены по склонам северо-восточной, восточной и юго-восточной экспозиции, что можно объяснить общим наклоном поверхности на восток на территориях штатов Монтана и Северная Дакота (приложение 7).

Удельная аварийность на различных типах элементарных поверхностей

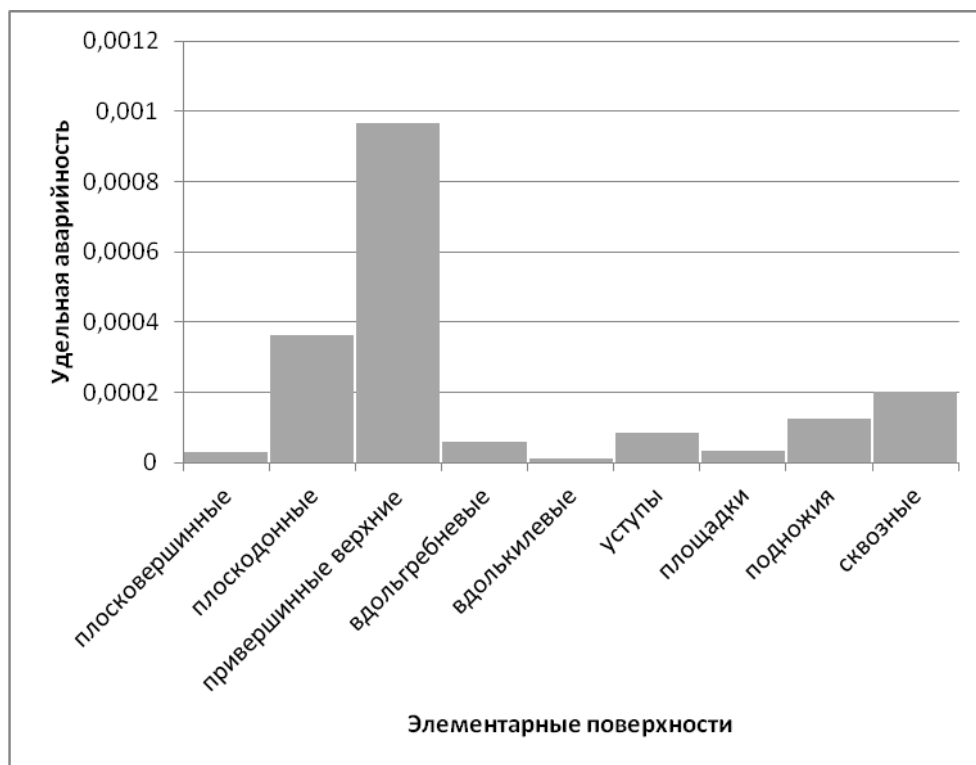


Рис.24. Удельная аварийность на различных типах элементарных поверхностей.

Наиболее безопасными элементарными поверхностями для прокладки трубопроводов являются площадки, вдолькилевые и плосковершинные поверхности, по ним чаще всего и прокладывают трубопроводы (приложение 8). Более высокие значения аварийности (рис.24) наблюдаются на вдольребневых поверхностях, уступах и подножиях, а также на сквозных поверхностях, что объясняется большей относительной крутизной и развитием склоновых и эрозионных процессов. Наиболее аварийноопасными оказались плоскодонные поверхности, где развита аккумуляция вещества и высока влажность грунта, и привершинные верхние поверхности. Привершинные верхние поверхности, так же, как и вдольребневые, являются инициальными поверхностями – с них начинаются потоки; при первичном распределении осадков и веществ максимум выпадает именно на верхних поверхностях.

Распределение аварий по близости к структурным линиям.

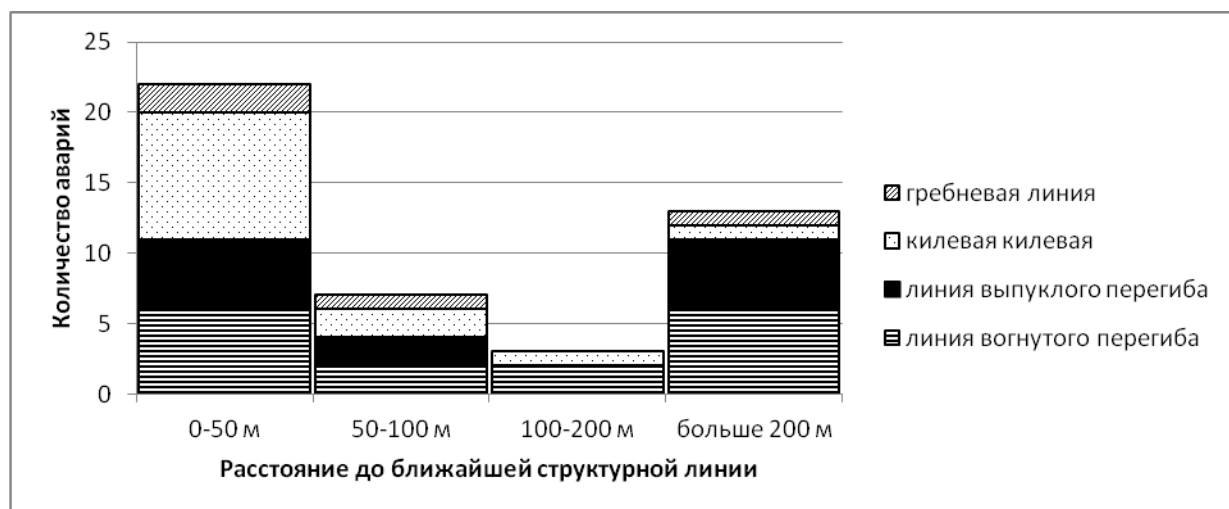


Рис.25. Распределение природообусловленных аварий по близости к структурным линиям.

Максимальное количество аварий приурочены к линиям вогнутых перегибов (подножья) и килевым линиям при удалённости аварий от структурных линий 0-50 м. Это те геоморфологические границы, где максимальна линейная эрозия и аккумуляция вещества, а также максимальна влажность грунтов. Любой изгиб трубы обладает повышенной опасностью в плане возможного развития стресс-коррозии в силу особенностей воздействия движущихся углеводородов на стенки трубы в месте изгиба и напряжения, возникающего в металле под действием растяжения. Стресс-коррозия как специфический вид коррозионного растрескивания под напряжением был идентифицирован ещё в 1950-х годах прошлого века.

Хорошо прослеживается зависимость от удалённости аварий от структурной линии: максимальное количество аварий отмечено при малых расстояниях от структурной линии (0-50 м), при расстоянии 50-100 метров количество аварий уменьшается, 100-200 метров - количество аварий наименьшее. Аварии, которые расположены от структурной линии более чем на 200 метров, обусловлены другими природными или антропогенными факторами.

5.2. Анализ распределения природообусловленных аварий по различным типам четвертичных отложений

Для анализа распределения природообусловленных аварий по различным типам четвертичных отложений использовалась база данных "Национальная геологическая карта США" (National Geologic Map Database (NGMDB)) Геологической службы США (U.S. Geological Survey) и Ассоциации американских государственных геологов (Association of American State Geologists (AASG)) (URL: <http://ngmdb.usgs.gov/mapview/>). Эта база посредством интерактивной карты даёт доступ к картам и публикациям Геологической службы США, правительственных агентств, обществ, университетов и частного сектора. Были собраны сведения о том, на каких типах четвертичных отложений происходили аварии трубопроводов.

К сожалению, так как геологические карты в США создаются различными агентствами, обществами, университетами и даже частным сектором, легенды этих карт не унифицированы, нет единого образца легенды. Зато все условные обозначения сопровождаются подробным описанием, благодаря чему стало возможным приведение легенд разных карт к единому виду для последующего анализа четвертичных отложений. Генетические типы четвертичных отложений были выделены в соответствии с требованиями Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ) к условным обозначениям к карте четвертичных образований территории РФ (URL: <http://www.vsegei.ru/ru/info/quaternary-2500/>) .

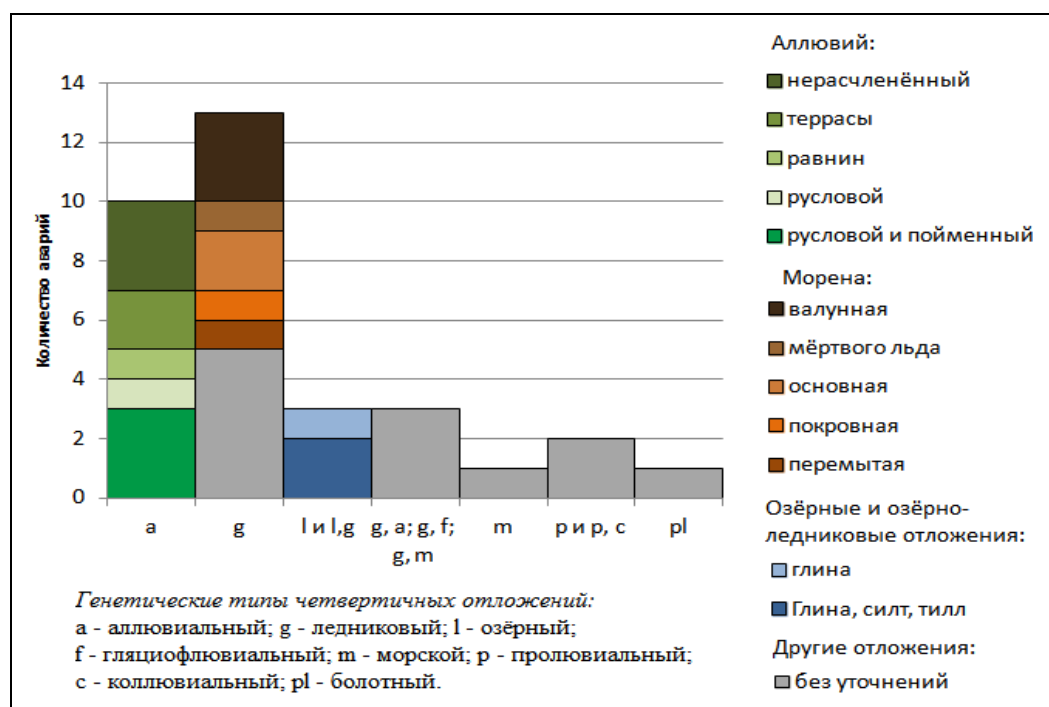


Рис.26. Распределение аварий по генетическим типам четвертичных отложений.

На графике (рис.26) представлено распределение аварий по генетическим типам четвертичных отложений. В легенду графика, помимо самих генетических типов, также вынесены уточнения, которые были отмечены в первоначальных легендах геологических карт США (например, в части легенд было деление на аллювий нерасчленённый, аллювий террасы, русловой и т.д.; в другой части легенд было указание на литологический состав озёрных и озёрно-ледниковых отложений; пр.). Часть карт отличалась краткими легендами без подробного описания отложений, что также вынесено в легенду графика (серый цвет - "без уточнений", рис.26).

На графике (рис.26) видна явная приуроченность аварий к аллювиальному и ледниковому типам четвертичных отложений. Приуроченность аварий к *ледниковому генетическому типу* отчасти объясняется широким распространением ледниковых отложений на территориях штатов Монтана, Северная Дакота и Аляска вследствие обширного оледенения в плейстоцене. Моренные образования неоднородны по мощности и по простираию, а также по гранулометрическому составу. Морена может быть сложена глинистым материалом, который образовался вследствие механического перетирания более крупных обломков горных пород. Помимо глинистой фракции, в составе морен также присутствует песчаная и грубообломочная фракции, в целом состав морены неоднороден. Отрицательным качеством всех глинистых ледниковых отложений является наличие случайных вкраплений отдельных, иногда очень крупных валунов, которые иногда при инженерно-геологических изысканиях ошибочно принимают за коренные скальные породы (Ананьев, 2005).

Гляциофлювиальные отложения (зандровые равнины и озы) в целом являются удовлетворительным основанием для сооружений, в том числе трубопроводов, при условии отсутствия явлений плавунности.

Высокая аварийность *аллювиальных отложений* уже отмечалась А.Д.Армандом, который считал наиболее аварийноопасными 2-ые надпойменные террасы, которые сложены пойменным или, реже, русловым аллювием (Арманд, 1993). Для современного пойменного аллювия характерна высокая влажность, несущая способность таких грунтов низкая. Суглинистые и глинистые отложения легко переходят в пластичное и даже текучее состояние. Древний пойменный аллювий обычно представлен суглинками и глинами твердой консистенции, которые часто имеют лессовидный облик и обладают просадочными свойствами. Для аллювиальных отложений характерна многослойность, разные слои могут обладать различной сжимаемостью. Также с аллювиальными

отложениями связаны такие явления, как плавунность песчаных и набухание глинистых грунтов (Ананьев, 2005).

Для *озёрных и озёрно-ледниковых* отложений характерна слоистость. В прибрежной зоне водоёма сложена более крупнообломочным материалом - песками, гравием, галькой, а в центральной части водоёма осаждаются более мелкие частицы - глины, илы. Несущая способность глинистых грунтов сильно зависит от консистенции грунта, которая прямо пропорциональна влажности и обратно пропорциональна показателю пластичности грунта. Глинистые грунты при консистенции менее 0,25 находятся в твердом или полутвердом состоянии и могут служить очень хорошим основанием. При консистенции 0,25 - 0,75 грунт находится в тугопластичном-мягкопластичном состоянии, использование его в качестве основания ограничено. При консистенции выше 0,75 глинистый грунт находится в текучепластичном или текучем состоянии и не может являться надёжным основанием для инженерных сооружений (Механика, 2013). Показатели деформационно-прочностных свойств озерно-ледниковых отложений изменяются в широком диапазоне. Наиболее благоприятными характеризуются пески. Озерно-ледниковые отложения могут быть льдистыми, при протаивании возможна большая и неравномерная осадка сооружений (Сергеев, 1982).

Инженерные свойства *морских отложений* определяются условиями их образования. Так, глубоководные отложения по сравнению с мелководными более однородные и мощные. Однако следует учитывать то, глины часто находятся в переуплотненном состоянии и на крутых откосах часто возникают оползни. Отложения на шельфах довольно единообразны по напластованию, а отложения, сформировавшиеся в береговой зоне, изменчивы по всем характеристикам. Толщи современных прибрежных илов относятся к слабым по прочности и устойчивости грунтам. Надёжным основанием для инженерных сооружений могут служить породы обломочного происхождения (пески, галечники и другие) (Ананьев, 2005).

Пролувиальные отложения - это результат деятельности временных водотоков, а также селевых потоков значительной силы. Эти отложения плохо сортированы, для них характерно наличие включений пород разной размерности. У подножия гор формируются пролувиальные конуса выноса. Пролувий состоит в основном из галечников, к периферии отложения становятся более мелкозернистыми. В толще встречаются и глинистые образования в виде маломощных (1—5 м) прослоев и линз. Обычно глинистые породы песчаные или сильнопылеватые, распределение частиц в породе хаотично, что влияет на прочностные, деформационные и водно-фильтрационные характеристики грунта (Ананьев, 2005). *Коллувиальные отложения* формируются по воздействию

оползневых, обвально-осыпных, солифлюкционных и курумных процессов. В их формировании определяющую роль играют устойчивость склона, его крутизна и угол естественного откоса, физико-механические свойства слагающих склон пород и др. Коллювиальные отложения довольно редко используются в качестве оснований для инженерных сооружений.

Болотные отложения формируются под воздействием процессов разложения органического вещества в анаэробных условиях, минерализации и различных биохимических процессов. Торфяные отложения так же, как и сами болота, делят на верховые (олиготрофные), низинные (эвтрофные) и переходные (мезотрофные). Помимо торфа в болотных отложениях образуются пылеватые пески-пывуны и илы, прослойки и линзы различных руд (фосфатных, марганцевых и др.), зеленая глина, озерный мергель, сапропели и другие, сложные органоминеральные агрегаты и соединения. Эти осадки неустойчивы, их физико-механические свойства зависят от их влажности и улучшаются с её понижением. Все виды болотных отложений являются сильносжимаемыми основаниями, поэтому для инженерных целей крайне нежелательны (Ананьев, 2005).

Глава 6. Сравнение полученных данных о распределении аварий в северных штатах США с литературными данными о распределении аварий в Российской Федерации

К сожалению, данные по аварийности трубопроводов Российской Федерации отсутствует в открытом доступе, но есть некоторые литературные данные по отдельным регионам РФ (Машков, 2006; Жиров и др., 2016), а также общие данные по аварийности газопроводов РФ с 1990 по 2015 года (Власова, 2017).

Сравнение по уклонам

Интересно сравнить данные, полученные для США, с распределением аварий на промысловых трубопроводах Чутырского и Сундурско-Нязинского месторождениях в Удмуртии по склонам различной крутизны (данные Машкова К.А. (Машков, 2006)). Для обеих стран в целом прослеживается возрастание аварийности в увеличении крутизны, а также резкое уменьшение аварийности на склонах 11-22° (таблица 1). Оценка потенциальной аварийности на Южно-Баганском месторождении в республике Коми (Жиров и др., 2016) показала примерно такую же закономерность.

Таблица 1. Распределение удельной аварийности (количество прорывов/км × г) по склонам различной крутизны на промысловых трубопроводах Удмуртии (Машков, 2006)

крутизна склона		0-2 °	2-4 °	4-6 °	6-11 °	11-22 °
удельная аварийность						
Общая на Чутырском и Сундурско-Нязинском месторождениях		0,38	0,41	0,37	0,34	0,19
На различных типах склона на Чутырском и Сундурско-Нязинском месторождениях	на еd (элювиально-делювиальном)	0,4	0,04	0,33	0	0
	на d(делювиальном)	0	2,04	0,35	0,39	0,19
	на ds(делювиально-солифлюкционном)	0,12	0,71	0,58	0	0
Общая на Чутырско-Киенгопском		0,53	1,06	0,94	0,92	0,47

Сравнение по экспозиции

Сравним данные Машкова К.А. (Машков, 2006) с полученными данными по США по экспозиции. Здесь прослеживается такая же, как и в северных штатах США, закономерность (рис.27): в целом аварийность северных склонов выше, чем южных. Причина аварийности в повышенной влажности и меньшей теплообеспеченности склонов, что приводит к возрастанию коррозии. Также К. А. Машков (Машков, 2006) отмечает,

что основными причинами коррозии на подобных склонах, кроме повышенного увлажнения, могут быть интенсивная почвенная коррозия и высокие скорости криогенного и гидрогенного крипа (Розенбаум, 1989).



Рис.27. Распределение аварий на Чутырском и Сундурско-Нязинском месторождениях по склонам различной экспозиции (по материалам Машкова К.А. [9])

Сравнение по генетическим типам четвертичных отложений

Согласно данным Машкова К.А. (Машков, 2006), повышенной аварийностью отличаются делювиальные, делювиально – солифлюкционные склоны и овражно-балочные комплексы, а также пойменные отложения и отложения I надпойменных террас (в целом максимальное число прорывов приурочено к склонам и аллювиальным поверхностям) (таблица 2). Пониженную аварийность Машков К.А. отмечает на элювиально-делювиальных отложениях. Подобная закономерность прослеживается и в северных штатах США – наиболее аварийноопасны аллювиальные отложения, особенно пойменный аллювий, а также нерасчленённый и аллювий террас. Элювиально-делювиальные отложения неаварийноопасны (в северных штатах США на элювии не произошло ни одной аварии). Повышенной аварийностью отличаются и болотные отложения.

Таблица 2. Распределение удельной аварийности(прорывов/км × г) по стратиграфо-генетическим и геоморфологическим комплексам.

Стратиграфо-генетич. и геоморфологические комплексы	edQII-IV			dsQII-III	dQIII-IV	aQIII	paQIV	aQIV
	поверхн. выравнивания	останцовые холмы	эроз.-денуд. склоны					
Количество прорывов на месторождениях								
на Чутырском и Сундурско-Нязинском	0,11	0	0,11	0,19	0,17	0,45	0,2	0,21
на Чутырско-Киенгопском	0,52	0,66	0,51	0,84	2,1	1,63	1,03	1,64
на Киенгопском	2,92	0	0	3,23	6,17	0	6,35	0

Сравнение по приуроченности к элементарным поверхностям

Наиболее аварийноопасными Арманд А.Д. (Арманд, 1993) считал надпойменные террасы (то есть уступы), особенно вторую надпойменную террасу. Учитывая, что при пересечении рек для трубопроводов создаются мостовые переходы и фактически труба касается поверхности земли за пределами поймы, это вполне объяснимо. Также Арманд А.Д. считал, что повышенной аварийностью характеризуются выпуклые перегибы поверхности на бровках. В северных штатах США также отмечено повышение аварийности на уступах.

Сравнение причин аварийности

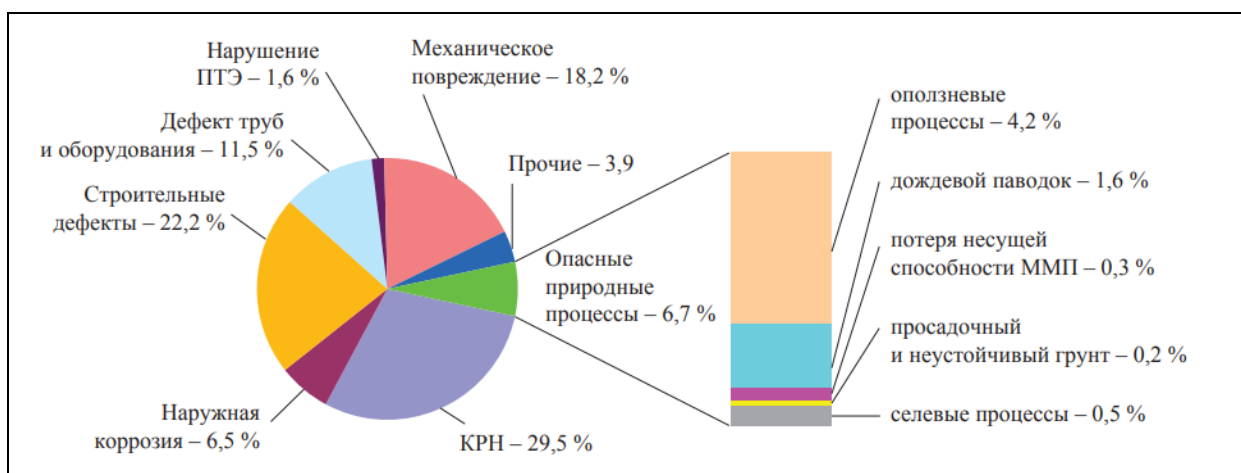


Рис.28. Структура причин аварийности линейной части магистральных трубопроводов ПАО «Газпром» за период 1990–2015 гг.: ПТЭ – правила технической эксплуатации; ММП – многолетнемерзлые породы; КРН - коррозионное растрескивание труб под напряжением (Власова, 2017).

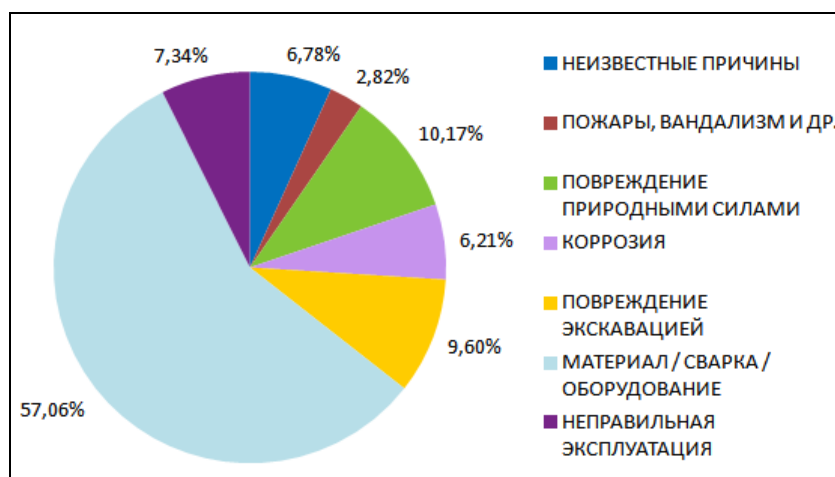


Рис.29. Распределение аварий северных штатов США по причинам (2002-2017 гг.), по данным (по данным Национальной системы картографирования трубопроводов США.

(URL: <http://pvnpm.phmsa.dot.gov/PublicViewer/>)).

Большинство аварий как на трубопроводах северных штатов США (Национальная система картографирования трубопроводов США. (URL: <http://pvnprms.phmsa.dot.gov/PublicViewer/>)), так и на газопроводах РФ (Власова, 2017) связано с деятельностью человека, а не с природными причинами. Для газопроводов РФ доля аварий с четким указанием на природные факторы составляет всего 6,8%, а для северных штатов США – 10,17% (рис.28 и рис.29).

На аварийность трубопроводов влияет и коррозия (включая наружную и стресс-коррозию), которая относится к тем факторам, в которых велика доля природной составляющей. Её доля особенно велика для линейной части трубопроводов и составляет на газопроводах РФ – 36% и 6,21% – в северных штатах США.

Значительный вклад в аварийность трубопроводов вносят дефекты труб и оборудования: в РФ – 11,5%, а в северных штатах США – 57,06%. Велик и урон от нарушений при проведении строительных работ – 22,2% в РФ и 9,6% на севере США. Доля аварий от нарушений правил технической эксплуатации сравнительно невелика – 1,6% в РФ и 7,4% в северных штатах США.

На трубопроводах РФ одним из специфичных факторов аварийности трубопроводов является несанкционированная врезка (до половины причин аварий в зависимости от региона). В США подобные случаи отдельно не отмечаются, зато в группу «другие повреждения внешними силами» включены: пожар и взрывы как основная причина аварий; вандализм; разрыв ранее поврежденных трубопроводов; повреждения автомобилями, грузовиками или другими транспортными средствами, не связанными с деятельностью по эксплуатации трубопровода) – 2,82% аварий.

Заключение

Был проведён детальный анализ статистики аварий на трубопроводах США для выявления зависимости аварийности от рельефа. Для того, чтобы результаты анализа были сравнимы с последующими исследованиями в этой области, был использован системно-морфологический подход А.Н. Ласточкина, в рамках которого возможно однозначное выявление естественной делимости рельефа и выделение элементарных ландшафтов (элементарных поверхностей). Для каждой аварии были измерены геотопологические параметры той элементарной поверхности, на которой она произошла. Чтобы учесть тот факт, что трубопроводы чаще всего прокладывают в наиболее безопасных местах, геотопологические параметры также были измерены на всей протяжённости "репрезентативного трубопровода", который проходит через все представленные в северных штатах США природные зоны. В итоге в анализ зависимости аварийности от крутизны склонов, вертикальной кривизны, горизонтальной кривизны, относительной высоты, экспозиции и приуроченности к элементарным поверхностям была включена не абсолютная величина количества аварий, а относительная – удельная аварийность трубопроводов (количество аварий с определённым значением геотопологического параметра/протяжённость репрезентативного трубопровода, проходящего по элементарным поверхностям с таким же значением геотопологического параметра).

Также был проведён анализ распределения природообусловленных аварий по различным типам четвертичных отложений. Легенды карт Геологической службы США были приведены к единому виду для дальнейшего обобщения и анализа. Выявленные закономерности распределения аварий по генетическим типам четвертичных отложений были объяснены с привлечением данных о физико-механических, прочностных свойствах грунтов.

Полученные данные по аварийности трубопроводов США были сопоставлены с литературными данными по аварийности отдельных регионов Российской Федерации, а также с общими данными о причинах аварийности в РФ.

В результате проделанной работы были сделаны следующие выводы:

1) Повышенная аварийность выявлена:

– на абсолютных высотах 400-900 м, что обусловлено физико-географическим положением северных штатов США, где значительную часть занимают горы или возвышенные равнины. С абсолютной высотой связана вертикальная расчлененность рельефа, которая является негативным фактором для трубопроводов;

- на склонах с относительной высотой 83-99 метров из-за большой крутизны и сильной расчленённости этих склонов;
- на склонах с крутизной 4-8° (что связано с максимальной влажностью грунтов и наиболее интенсивным массовым движением грунта) и особенно выше 23° (из-за изменения давления в трубопроводе);
- на вогнутых в плане склонах, что связано с высокой вероятностью активизации опасных экзогенных, в том числе линейной эрозии;
- на сильновогнутых (из-за повышенной влажности) и сильновыпуклых (из-за интенсивного выноса веществ) в профиле склонах;
- на склонах северной, восточной и северо-восточной экспозиции (причина - повышенная влажность грунтов из-за муссонной циркуляции атмосферы в Монтане и Северной Дакоте и меньшей теплообеспеченности северных склонов в северном полушарии). Отмеченная аварийность на юго-западных и западных склонах объясняется выпадением осадков на склонах этих экспозиций на юге Аляски;
- на плоскодонных (из-за повышенной влажности) и привершинных верхних поверхностях (из-за максимального прихода влаги при первичном распределении осадков и веществ);
- на линиях вогнутых перегибов и килевых линиях (где происходит линейная эрозия и аккумуляция вещества). Также отмечено влияние близости к структурным линиям: на расстоянии 0-50 м отмечено наибольшее количество аварий;
- на аллювиальных отложениях (из-за влажности современного пойменного аллювия и лёссовидного облика древнего пойменного аллювия; общей многослойности аллювиальных отложений и, как следствие, изменчивости прочностных характеристик в одной толще).

2) Выявленные закономерности распределения аварий трубопроводов северных штатов США по уклонам, экспозиции, четвертичным отложениям и типам элементарных поверхностей в общем совпали с данными из литературных источников по российским трубопроводам. Существенные различия обнаружены в причинах аварийности, что связано со спецификой трубопроводных систем РФ и США и с особенностями составления актов технического расследования в этих странах. Но выявляются и общие тенденции:

- в обеих странах антропогенные причины преобладают;
- в обеих странах примерно одинаковый вклад в аварийность вносят природные причины;

- значительный вклад в аварийность вносят дефекты труб и оборудования, а также повреждения при строительных работах;
- отмечена низкая аварийность по причине нарушения правил технической эксплуатации.

Результаты работы можно применять при предпроектных инженерно-геологических изысканиях при выборе наименее аварийноопасного маршрута трубопровода.

Промежуточные результаты работы были представлены на следующих научных конференциях:

1. Доклад «Анализ влияния природных факторов на аварийность трубопроводов» на I Всероссийской студенческой конференции «Стратегическое развитие России: внешние и внутренние вызовы», проходившей 15 декабря 2017 года в Санкт-Петербургском государственном университете;
2. Доклад «Факторы аварийности трубопроводов в северных штатах США» на Третьей международной научной конференции «Арктика: история и современность», проходившей 18-19 апреля 2018 года в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого;
3. Доклад «Геоморфологические факторы аварийности трубопроводов (на примере северных штатов США)» на Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Теория и практика современных географических исследований», посвященной 180-летию российского путешественника и натуралиста, исследователя Центральной Азии Н.М. Пржевальского, СПб, 2019.

Список использованной литературы:

1. Alden W.C., 1932, Physiography and glacial geology of eastern Montana and adjacent areas, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 174, 133.
2. Aronow S., Dennis P.E., Akin P.D., 1953, Geology and groundwater resources of the Minnewuakan area, Benson County, North Dakota, North Dakota Geol. Surv. Ground-Water Stud. 19, 125.].
3. Clayton L., 1962, Glacial geology of Logan and McIntosh Counties, North Dakota, North Dakota Geol. Surv. Bull. 37, 84.
4. Coulter H. W., Hopkins D. M., Karlstrom T. N. V., Pewe T. L., Wahrhaftig C., Williams J. R., Extent of glaciation in Alaska, U.S.Geol. Surv. Misc. Geol. Inv. Map I-415, 1968
5. Hopkins, 1972, The paleogeography and climatic history of Beringia during late Cenozoic time: Internord, no. 12, p. 121-150.
6. Howard A.D., 1960, Cenozoic history of northeastern Montana and northwestern North Dakota with emphasis on the Pleistocene, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 326, 107
7. Karlstrom T. N. V., 1960, Surficial deposits of Alaska, U. A. Geol. Surv. Prof. Pap. 400-B, 333-335.
8. Lemke R.W., 1960, Geology of the Souris River area, North Dakota, U.S.Geol. Surv. Prof. Pap., 325, 138.
9. Lemke R.W., Laird W.M., Tipton M.J., Lindvall R.M., Quaternary geology of northern Great Plains, 1965, Princeton Univ. Press
10. McBratney A.B., Odeh I.O.A., Bishop T.F.A., Dunbar M.S., Shatar T.M., An overview of pedometric techniques for use in soil survey, Geoderma, Vol. 97, № 3–4, P. 293–327, 2000.
11. Nichols D.R., 1960, Slump structures in Pleistocene lake sediments, Copper River Basin, Alaska, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 400-B
12. Pewe T. L., Hopkins D. M., Giddings J. L., The Quaternary geology and archaeology of Alaska, 1918-1999
13. Powers H.A., Wilcox R.E., 1964, Volcanic ash from Mount Mazama (Crater Lake) and from Glacier Peak, Science, 144, 1334-1336.
14. Ritter D.F., 1967, Terrace development along the front of the Beartooth Mountains, southern Montana: Geological Society of America Bulletin, v. 78, p. 467-484
15. Townsend R.C., Jenke A.L., 1951, The problem of the origin of the Max moraine of North Dakota and Canada, Amer. Journ. Sci., 249, 842-858
16. Wayne, W.J., Aber, J.S., Agard, S.S., Bergantino, R.N., Blumle, J.P., Coates, D.R., Cooley, M.E., Madole, R.F., Marftin, J.E., Mears, B.J., Morrison, R.B., and Sutherland, W.M., 1991,

- Quaternary geology of the northern Great Plains, in Morrison, R.B., ed., *Geology of North America*, Vol. K-2, Quaternary Nonglacial Geology: Conterminous U.S.: Boulder, Colo., The Geological Society of America, p. 441–476.
17. Амосов М. И., Артемьев Ю. М., Москаленко И. Г., Сыромятина М. В., Температурно-влажностные условия природных зон мира // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2011. №3., стр.101
 18. Ананьев, В.П.; Потапов, А.Д.; Изд-во: М.: Высшая школа, 'Инженерная геология: Учебник для строительных специальностей вузов', 2005
 19. Арманд А.Д. Рукотворные катастрофы // Изв. РАН. Сер. геогр.. 1993. №5. С. 32-39.
 20. Власова Л.В. Оценка влияния природных воздействий в задачах обеспечения надежной и безопасной эксплуатации газотранспортной системы ПАО «Газпром» // Вести газовой науки. 2017. №1 (29)
 21. Волков А.В., "Инженерно-геоморфологическая оценка условий строительства газотранспортных систем в Ленинградской области", автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата географических наук (на правах рукописи), 2009
 22. Жиров А.И., Болтрамович С.Ф., Калыгин М.Н. Инженерные изыскания на системно-морфологическом основе в районе нефтегазовых объектов в северных российских регионах // ИнтерКарто/ИнтерГИС. 2016. № 2. С. 88–97.
 23. Ласточкин А. Н. Общая теория геосистем. - СПб.: Изд-во «Лема», 2011.- 980 с.
 24. Марахтанов В.П., Великоцкий М.А. Оптимизация размещения проектируемых магистральных газопроводов на севере Западной Сибири с учетом ландшафтных особенностей территории // Трубопроводный транспорт (теория и практика). 2015. № 1 (47). - С. 14-17.
 25. Машков К.А. «Четвертичные отложения и экзогенные процессы как факторы экологического риска на промысловых нефтепроводах» (автореферат дис. на соиск. уч. ст. канд. геогр. наук). Ижевск. 2007. 22 с.
 26. Машков К.А. Геоморфологические условия как фактор сохранности промысловых трубопроводов(на примере месторождений Удмуртии) // Нефтегазовое дело. №1. 2006. – С.37-42.];
 27. Механика грунтов : методические указания к лабораторным работам / сост. : С. А. Пьянков, З. К. Азизов. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 46 с.
 28. Розенбаум Г.Э., Мудров Ю. В., Тумель Н. В. География, интенсивность и динамика криогенной солифлюкции // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География.1989. №1.
 29. Савонин С.В., Москаленко А.В., Алексеева Н.Н., Тюндер А.В., Арсентьева З.А. Аварии на магистральных трубопроводах // Газ России. 2015. №4. – С. 70-73.

30. Сергеев Е. М. Инженерная геология, изд. 2. М., Изд-во Моск. ун-та, 1982. 248 с.
31. Симонов Ю. Г., Кружалин В. И. Инженерная геоморфология: Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 207 с.

Интернет-ресурсы:

32. База данных "Национальная геологическая карта США" (National Geologic Map Database (NGMDB)) Геологической службы США (U.S. Geological Survey) и Ассоциации американских государственных геологов (Association of American State Geologists (AASG)). URL: ngmdb.usgs.gov/mapview/ (дата обращения: 27.02.2019)
33. Зарубежный (США и Индия) онлайн-ресурс карт и картографических материалов. URL: www.mapsofworld.com (дата обращения: 05.05.2019)
34. Официальный сайт Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), требования карте четвертичных образований территории Российской Федерации. Масштаб 1:2 500 000. URL: www.vsegei.ru/ru/info/quaternary-2500/ (дата обращения: 17.03.2019)
35. Официальный сайт Национальной системы картографирования трубопроводов США (The National Pipeline Mapping System – NPMS). URL: pvnpm.phmsa.dot.gov/PublicViewer/ (дата обращения: 09.09.2018)
36. Официальный сайт Обсерватории вулканов Аляски (The Alaska Volcano Observatory) – совместной программы Геологической службы Соединенных Штатов (USGS), Геофизического института Университета Аляски Фэрбенкс (UAFGI) и штата Аляски по геологическим и геофизическим исследованиям (ADGGS) по мониторингу вулканов Аляски. URL: www.avo.alaska.edu (дата обращения: 05.05.2019)
37. Официальный сайт Службы охраны природных ресурсов (ранее известная как Служба охраны почв) – агентства Министерства сельского хозяйства США (Natural Resources Conservation Service). URL: www.nrcs.usda.gov (дата обращения: 05.05.2019)
38. Российский онлайн-ресурс карт и картографических материалов. URL: www.planetolog.ru (дата обращения: 05.05.2019)
39. Электронная энциклопедия по географии США. URL: www.netstate.com (дата обращения: 05.05.2019)

Картографические материалы:

40. Generalized Glacial Map of North Dakota, by Wilson M. Laird, 1965 (Repr. 1967). North Dakota Geological Survey
41. Surface Geology of North Dakota, by S. R. Moran, Nov., 1973. North Dakota Geological Survey

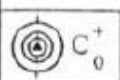






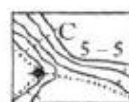
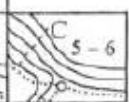
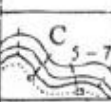










Приложения


Приложение 1. Полная группа и систематика линейных элементов земной поверхности (Ласточкин, 2011). Структурные линии показаны в виде отличительных точек — их проекций на поперечный профиль и пунктирных линий, различающихся по кривизне в плане.

СТРУКТУРНЫЕ ЛИНИИ (L)									
По положению по вертикали	По форме в поперечном профиле	Линии принципиальной симметрии			Линии принципиальной диссимметрии			Не выраженные в профиле	
		Плавные L^a	Резко выраженные L^c	Ломаные L^b	L^{c-a}	L^{a-b}	L^{b-c}		
					L^{a-c}	L^{b-a}	L^{c-b}		
Верхние									
	Выпуклые	Гребневые L_1							
		Выпуклых перегибов L_5	—	—					
			—	—	—	—			
		Вогнутые	Вогнутых перегибов L_6	—	—	—	—		
—	—								
Собственно склоновые	Вогнутые	Килевые L_2							
Нижние									
Сквозные	Морфоизографы L_7								L_7

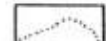
ПО ФОРМЕ В ПЛАНЕ		
Выпуклые \hat{L}	Вогнутые \bar{L}	Прямолинейные \bar{L}

Приложение 2. Полная группа и систематика точечных элементов (Ласточкин, 2011).
 Характерные точки показаны в плане. 1 - горизонтали с бергштрихами; 2 - структурные линии L_1, L_2, L_5, L_6 ; 3 - морфоизографы (L_7); вершины положительных (а) и отрицательных (б) изометричных форм земной поверхности; 5 - всесторонне выдающиеся (а) и вдающиеся (б) характерные точки; 6 - выпукло-вогнутые ХТ.

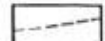
По положению по вертикали:		ХАРАКТЕРНЫЕ ТОЧКИ (С)						
		Выпуклые			Вогнутые			Не выраженные в профиле
		По форме в профиле			По форме в профиле			
		—	L_1	L_5	L_6	L_2	—	L_7
Верхние	Выпуклые							
		L_1						
	Вогнутые	L_5	 					
		L_6						
Нижние	Выпуклые	L_2						
								
Сквозные	Выпуклые	L_1						




1




2





3






4

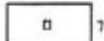




5



6

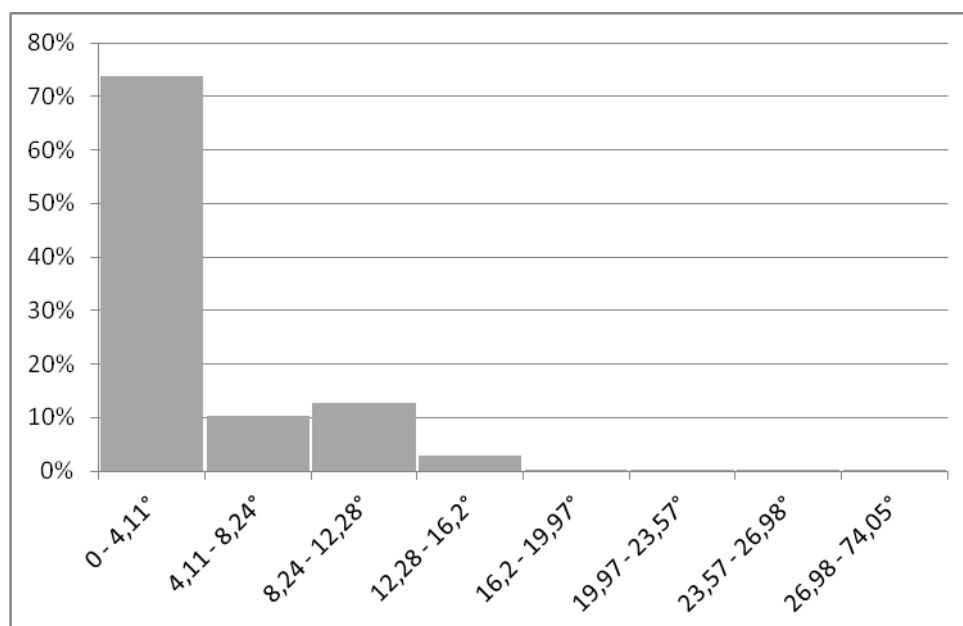


7

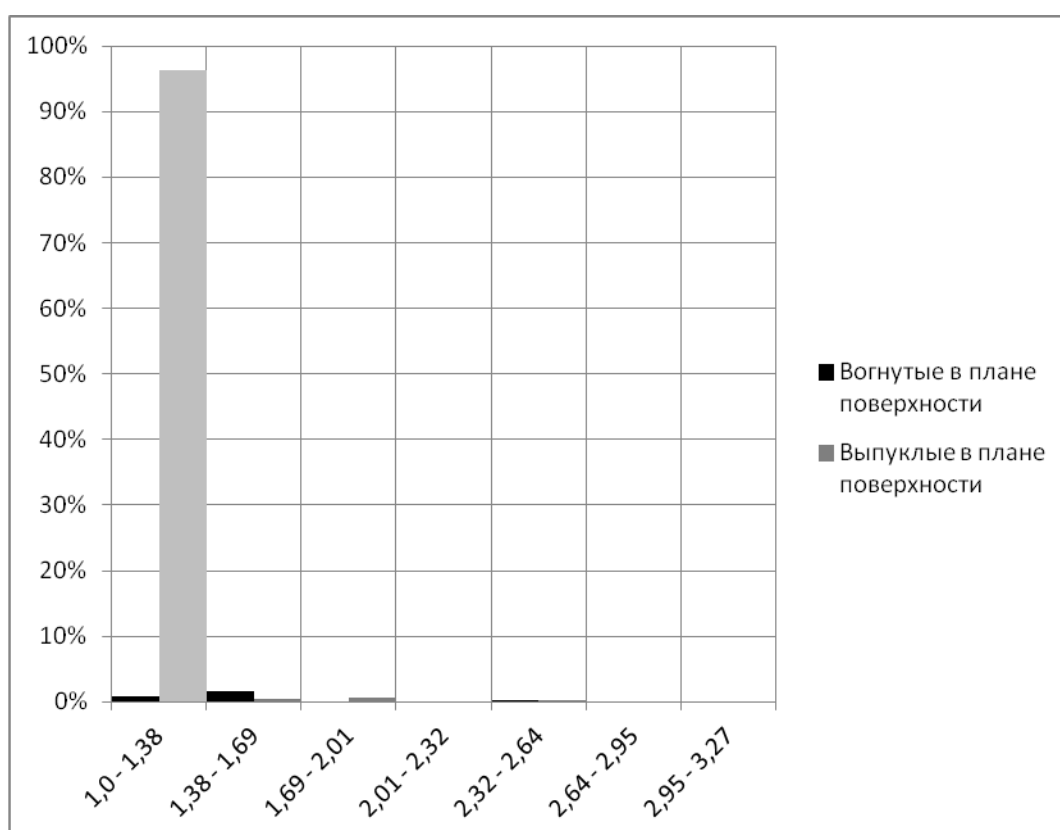
Приложение 3. Систематика площадных элементов (Ласточкин, 2011). Элементарные поверхности показаны жирными линиями — их проекциями на профиль. Продолжающие их тонкие линии отражают смежные с ними на профиле площадные элементы.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ (Р)											
По положению по вертикали и по относительной крутизне		По форме в поперечном профиле									
		Вогнутые (Р ^{с-а})		Выпуклые (Р ^{а-с})		Прямолинейные (Р ^{б-б})					
		По «абсолютной» крутизне								Вертикальные (Р)	Горизонтальные (-Р)
		Наклонные (Р или /Р)									
Верхние	Плосковершинные (Р ₊₅)										Р ₊₅
	Привершинные (Р _{0-п})										
	Вдольребневые (Р _{1-п})										
Собственно склоновые	Фасы (Р ₅₋₅)										
	Уступы (Р ₅₋₆)										
	Площадки (Р ₆₋₅)										
	Подножия (Р ₆₋₆)										
Нижние	Взолькленные (Р _{п-2})										
	Привершинные (Р _{п-0})										
	Плосковершинные (Р ₆₋)										Р ₆₋
Сквозные											
ПО ФОРМЕ В ПЛАНЕ											
Выпуклые \bar{P}				Вогнутые \bar{P}				Прямолинейные \bar{P}			

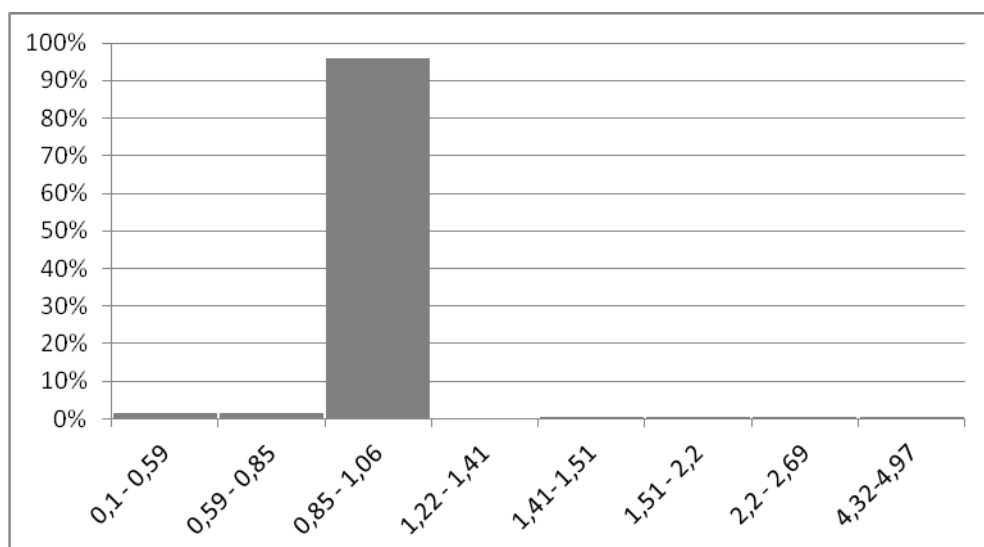
Приложение 4. Распределение значений уклона на всей протяжённости репрезентативного трубопровода.



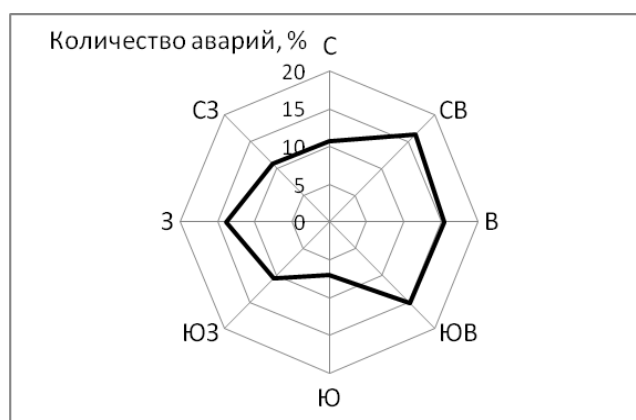
Приложение 5. Распределение значений горизонтальной кривизны на всей протяжённости репрезентативного трубопровода.



Приложение 6. Распределение значений вертикальной кривизны на всей протяжённости репрезентативного трубопровода.



Приложение 7. Распределение значений азимутов падения склона на всей протяжённости репрезентативного трубопровода.



Приложение 8. Распределение элементарных поверхностей на всей протяжённости репрезентативного трубопровода.

